海洋学报 Haiyang Xuebao
ISSN 0253-4193
CN 11-2055/P

不同海浪主导条件下的一维风涌分离方法研究

魏永亮，庞邓连，高志一，唐泽艳

Study on separation method for one-dimensional wind-sea and swell under different dominant wave conditions

Wei Yongliang, Pang Denglian, Gao Zhiyi, Tang Zeyan

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12284/hyxb2025057

魏永亮, 庞邓连, 高志一, 等. 不同海浪主导条件下的一维风涌分离方法研究[J]. 海洋学报, 2025, 47(6): 61–72, doi:10.12284/hyxb2025057
Wei Yongliang, Pang Denglian, Gao Zhiyi, et al. Study on separation method for one-dimensional wind-sea and swell under different dominant wave conditions[J]. Haiyang Xuebao, 2025, 47(6): 61–72, doi:10.12284/hyxb2025057

不同海浪主导条件下的一维风涌分离方法研究

魏永亮[1]，庞邓连[1]，高志一[2*]，唐泽艳[3]

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 3. 自然资源部 东海发展研究中心, 上海 201306)

摘要: 海洋中的混合浪通常由风浪和涌浪以一定比例组成, 因研究和应用等需求经常需要分离其中的风浪和涌浪。本文针对现有 4 种代表性一维谱风涌分离方法（1D 法）: PM 法 (Pierson-Moskowitz)、改进的 PM 法、JP 法 (Jesús-Portilla) 和频谱积分法, 利用中法海洋卫星上搭载的波谱仪提供的二维海浪谱数据, 对比分析了纯风浪、风浪为主、涌浪为主和纯涌浪 4 种海浪主导情况下的分离结果, 结果表明: （1）PM 法和改进的 PM 法分别在风浪为主和涌浪为主时各有更好的分离效果; （2）JP 法整体表现较差, 对不同海浪主导条件的响应不敏感; 频谱积分法在风浪占比较大时效果更佳; （3）随着混合浪中涌浪比例的增加, 适当增大 PM 法中分离频率的比例系数可提升分离精度。在此基础上结合波龄提出了一种分段 PM 法, 通过调整分离频率的比例系数, 在风浪主导和涌浪主导的条件下分别取 1.03 和 1.1 时, 得到的分离结果更为精确。

关键词: 海浪主导条件; 风涌浪分离; 中法海洋卫星; 海浪谱

中图分类号: P731.22　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−4193(2025)06−0061−12

1　引言

海洋中的混合浪通常以不同占比的涌浪和风浪组成, 二者在形成机制、特性和影响等方面有诸多不同。风浪是指当地风产生, 且一直处在风的作用之下的海面波动状态, 风速、风持续的时间（风时）和风吹过的距离（风区）都会影响到风浪的大小; 涌浪则指海面上由其他海区传来, 或者局地风力迅速减小、风向改变后海面上遗留下来的波动[1]。从海浪谱的角度来看, 风浪的能量通常分布在较高频率范围, 周期较短; 而涌浪的能量一般分布在较低频率范围, 谱峰形态较为稳定, 变化较慢, 反映了远处风暴的长期影响。风浪和涌浪除了在自身特性上有所区别外, 在其影响范围和应用需求上也有所不同。风浪主要影响局部海域, 而涌浪可以影响到远离风区的更广阔的海域。同时, 二者对船舶、结构物等的影响也有所不同[2]。因此, 对混合浪中的风浪和涌浪进行准确区分有助于深入理解不同波浪的形成和演化机制及相关作用特性, 使得实际应用中能够采取更具针对性的措施, 以更好地保障船舶航行和海上设施的安全。

划分风浪和涌浪的方法大致可分为两种, 一种是基于波浪和风参数实现风、涌主导类型的判别, 这种方法无法获取混合浪中具体的风浪和涌浪组成信息[3−6]; 另一种是利用海浪谱进行风涌分离, 海浪谱可以描述出混合浪中不同来源的波系统的组成和分布情况, 根据海浪谱维数的不同可以将海浪谱分离方法分为两种: 一维谱方法（以下简称“1D 法”）和二维谱方法（以下简称“2D 法”）。1D 法的基本思想是给出

收稿日期: 2024−09−23; **修订日期:** 2025−04−22。
基金项目: 国家自然科学基金（41976174, 41606196）; 农业农村部全球渔业资源调查监测评估项目（D−8025−24−5002）。
作者简介: 魏永亮（1983—）, 男, 山东省潍坊市人, 副教授, 主要从事海洋微波遥感研究。E-mail: yl-wei@shou.edu.cn
*** 通信作者:** 高志一, 高级工程师, 研究方向为海浪理论与小尺度海气相互作用。E-mail: gaozy@nmefc.cn

一个分离频率，将一维海浪频谱中对应高频的风浪部分和对应低频的涌浪部分分离开。目前已经提出了多种 1D 法，基于 PM 谱提出的使用当地 10 m 风速直接计算风涌分离频率的方法称为 PM 法，该方法未直接使用到海浪谱信息。李水清等[7]的研究认为该方法一定程度上高估了风浪，并对其中风涌分离频率与 PM 谱峰频率之间的比例系数进行了调整，提出了改进的 PM 法；Wang 和 Hwang[8]利用风浪和涌浪波陡特征差异，提出了波陡法，而后该方法又由 Hwang 等[9]进行了改进，对其中的波陡函数改为频谱函数，提出频谱积分法，进一步提高了风涌分离精度；Portilla 等[10]提出利用风浪特有的超射特性对风浪和涌浪进行分离。1D 法的优点在于分离原理相对简单，数据易获取，因而应用较为广泛。但由于一维海浪谱无法提供海浪在不同方向上的能量分布信息，因此分离精度有限。而 2D 法通过综合考虑海浪方向谱和风矢量信息进行风涌浪分离，可以给出较为可靠的分离结果，通常被认为是风涌浪分离的标准值[7]。尽管 2D 法在精度上具有明显优势，但由于现有二维海浪谱数据较为稀缺且较难获取，使得 2D 法的应用有着较大的局限性；同时，在某些关注于特定方向的风涌行为研究中，1D 法能够提供更具针对性和简化的分析；此外，由于 1D 法的复杂程度远小于 2D 法，使得其计算成本更低，效率更高。因此，探索更高精度的 1D 法及其适用条件仍有其实际意义。

不同 1D 法在实际应用中有着较明显的分离效果差异，同样的实测数据使用不同的 1D 法得到的分离频率往往存在差异[11]。从 1D 法的分离原理来看，不同风场条件或海浪主导类型（风浪主导或涌浪主导）会在海浪谱上表现出不同的特征[12]，而不同 1D 法对于这些特征的敏感度各不相同，从而导致分离效果的差异。因此，探究不同海浪主导条件下的 1D 法分离效果，有助于实际应用中根据具体海况下选择适宜的方法，从而提高分离的准确性和可靠性。

此前对海浪谱实测数据的研究多基于浮标所获取的局地海浪谱，数据量较少且覆盖范围较为局限。2018 年中法海洋卫星 CFOSAT（China-France Oceanography SATellite）发射，其上携带了可提供全球二维海浪谱信息的波谱仪 SWIM（Surface Wave Investigation and Monitoring），为海浪风涌分离研究提供了良好的数据条件。基于 SWIM 的全球海浪谱数据，本文将展开对不同海浪主导条件下 1D 风涌分离方法的比较研究，并结合分离结果进行方法改进，为不同的使用场景提供更准确的风涌浪分离方法参考。

2 数据介绍与处理

2.1 SWIM 数据

SWIM 是中法海洋卫星 CFOSAT 上搭载的国际首例星载海洋波谱仪。通过多方位向、多入射角观测来探测海浪方向谱以及海面风速，是一种 Ku 波段（13.575 GHz）的真实孔径雷达。SWIM 以 6 个入射角（0°、2°、4°、6°、8°和 10°）依次发射微波至海洋表面，其中 0°入射角的工作模式相当于高度计，可以获得海面有效波高等海浪参数信息；6°、8°、10°入射角的波束被称为“谱波束”，因为这些波束被用作估计海浪斜率谱，所得到的海浪谱波数范围为 0.012 6～0.278 9 m^{-1}[13]。有研究指出[14−15]，在中、高海况下，SWIM 波束在 8°和 10°入射角下提供的海浪方向谱与浮标数据具有较高的一致性；在低海况下，SWIM 海浪方向谱的偏差主要来自于小波数处的寄生波峰、雷达成像机制的非线性效应以及斑点噪声；而与 MFWAM 海浪模式数据结果对比研究得到[16]，SWIM 波束在 10°入射角下提供的谱数据精度优于在 6°和 8°下得到的测量结果。此外，SWIM 同时提供了从海浪谱中划分出来的能量占比最大的 3 个波分量信息，研究表明 SWIM 能较好地找到不同分区的谱峰[17]。因此本文选用 SWIM（version 5）在 2022 年 11 月 10°入射波束下的二维斜率谱及其波分量数据，以及 SWIM 二级产品中提供的来自 ECMWF 的 10 m 风数据，风数据的对应位置为每个二维谱覆盖区域的平均经纬度处。

2.2 数据处理

SWIM 提供的二维谱数据为斜率谱，需要将其转换为波高谱以进行后续讨论。斜率谱与波高谱存在式（1）的转换关系。由于谱分离方法针对的是频率谱，利用深水波频散关系 $\omega^2 = kg$ 和频率转换关系 $\omega = 2\pi f$，进一步将波数方向谱 $F(k, \theta)$ 转换为频率方向谱 $F(f, \theta)$，转换公式如下[18]：

$$F(k, \theta) = \frac{E(k, \theta)}{k^2}, \tag{1}$$

$$F(f, \theta) = F(k, \theta)\sqrt{\frac{k}{g}}4\pi, \tag{2}$$

其中：k 是波数，θ 是方位角，g 是重力加速度，取 g = 9.8 m/s^2。对二维谱在方向上积分可以得到一维谱：

$$F(f) = \int_0^{2\pi} F(f, \theta)\mathrm{d}\theta. \tag{3}$$

为比较不同方法得到的分离结果，分别对得到的风浪分区和涌浪分区进行积分，进而计算海浪中风浪的有效波高和涌浪的有效波高 H_s：

$$H_s = 4\sqrt{m_0}, \tag{4}$$

其中, m_0 为谱的 0 阶矩。评价比较不同方法的性能使用到的指标包括相关系数 r、均方根误差 RMSE 和偏差 Bias, 公式如下:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})(x_i-\bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}},\tag{5}$$

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-x_i)^2}{n}},\tag{6}$$

$$\mathrm{Bias}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-x_i)}{n},\tag{7}$$

其中: x 和 y 分别表示两个不同来源的数据, $\bar{x}$和$\bar{y}$表示它们的平均值。

3　风涌分离方法

3.1　一维风涌分离方法

3.1.1　PM 方法和改进的 PM 方法

PM 法中风涌分离频率 f_s 可由当地 10 m 风速 U_{10} 直接计算得到:

$$f_s=0.8f_{\mathrm{PM}},\tag{8}$$

其中, f_{PM}是 PM 谱的谱峰频率:

$$f_{\mathrm{PM}}=0.13\frac{g}{U_{10}}.\tag{9}$$

改进的 PM 法对上述方法中风涌分离频率 f_s 与 PM 谱峰频率 f_{PM} 之间的比例系数进行了调整, 调整后二者的关系为

$$f_s=1.2f_{\mathrm{PM}}.\tag{10}$$

3.1.2　JP 方法

Portilla 等[10] 提出了一种基于风浪超射特性来区分风浪和涌浪系统的方法。通过比较一维谱中的各个峰值与相同峰值频率下的 PM 谱峰值来区分不同的波浪系统, 两个峰值的比值 λ 定义如下:

$$\lambda=\frac{S(f_{\mathrm{p}})}{S_{\mathrm{PM}}(f_{\mathrm{p}})},\tag{11}$$

其中: $S(f_{\mathrm{p}})$ 是具有峰值频率 f_{p} 的目标波系统峰值, $S_{\mathrm{PM}}(f_{\mathrm{p}})$ 是具有相同峰值频率的 PM 谱峰值。根据上式结果, 若 $\lambda>1$, 说明该波系统满足出现超射现象的条件, 为风浪; 反之则为涌浪。再对两相邻波峰之间的“波谷”进行识别, 即可将不同的波系统区分开来。

3.1.3　频谱积分法

频谱积分法是波陡法的一种改进, 该方法通过计算频谱函数的峰值 f_{mb} 来求取风涌分离频率, 频谱函数的表达式为

$$I_b(f)=\frac{\int_f^{f_u}f'^2[S(f')/f'^b]\mathrm{d}f'}{\sqrt{\int_f^{f_u}[S(f'/f'^b)]\mathrm{d}f'}},\tag{12}$$

其中: f_u 为一维谱频率的上界。当 $b=1$ 时, 风涌分离效果最好, 此时该频谱函数的峰值频率为 f_{m1}, 与分离频率 f_s 的关系为

$$f_s=24.208\,4f_{m1}^3-9.202\,1f_{m1}^2+1.890\,6f_{m1}-0.042\,86.\tag{13}$$

3.2　二维风涌分离方法

SWIM 根据改进的分水岭算法[10, 19] 将海浪谱中能量占比最大的 3 个波分量划分出来。该方法对原始海浪谱进行了重采样及平滑处理以消除噪声影响, 之后对海浪谱进行 3 次迭代, 每次迭代只保留最大能量分区, 逐次得到共 3 个波浪分区。在每次划分波浪分区时, 仅保留分区总能量大于总谱能量 6.25% 的或有效波高大于 1 m 的分区, 每个分区即代表一个独立的波系统。划分出不同的波系统后, 根据式(14)可以对其进行风浪或涌浪的判别:

$$f_{\mathrm{p}}\geqslant\frac{g}{2\pi}(\beta U_{10}\cos\delta)^{-1},\tag{14}$$

其中: f_{p} 为该波系统的谱峰频率, δ 为风向与波向的夹角, U_{10} 为海面 10 m 风速, β 为波龄阈值, 分区谱峰频率满足上式则该波系统为风浪, 反之为涌浪。波龄阈值的选择通常在 1.0～1.9, 取值偏小可能会遗漏部分风浪, 偏大则容易混入因局地风改变遗留下来的老风浪。而 Hanson 等[19] 在研究中指出, 波龄选 1.5 时可以有效识别海浪谱中所有的潜在风浪系统。因此, 选用 1.5 作为波龄阈值, 以兼顾风浪识别的敏感性和普适性。

将得到的 3 个分区分别按以上方法进行风涌判别后, 将相同性质的波系统进行结合, 则得到了该海浪谱中所含的风浪和涌浪信息。将这 3 个分区组合成一个总谱, 构建成一个海浪谱数据模型, 即由 3 个已知类型的波系统组合而成, 而没有多余的噪声影响。进而在将二维谱转化为一维谱时, 避免了寄生波峰的影响, 而这是低海况时造成 SWIM 波谱失真的一个重要的影响因素[17]。因而使得由 3 个主波分量组成的谱相比于原始谱更适合用于一维风涌分离方法的比较。

4　结果与分析

4.1　二维风涌分离结果

以 2022 年 11 月 1 日 4 时 37 分的 SWIM 海浪谱为例, 图 1 为该时刻的 SWIM 二维谱及其划分的 3 个波分量示意图。图 1a 为该海浪谱中占比最大的第一

波分量，根据式(14)的判别方法，得到该海浪为涌浪，传播方向为 127.5°(307.5°)，谱峰波长约为 277.4 m。第二波分量(图 1b)同样判别为涌浪系统，传播方向为 142.5°(322.5°)，谱峰波长约为 123.2 m。第三波分量(图 1c)为风浪系统，传播方向为 37.5°(217.5°)，谱峰波长约为 101 m。该时刻的 10 m 风方向为 221.8°。

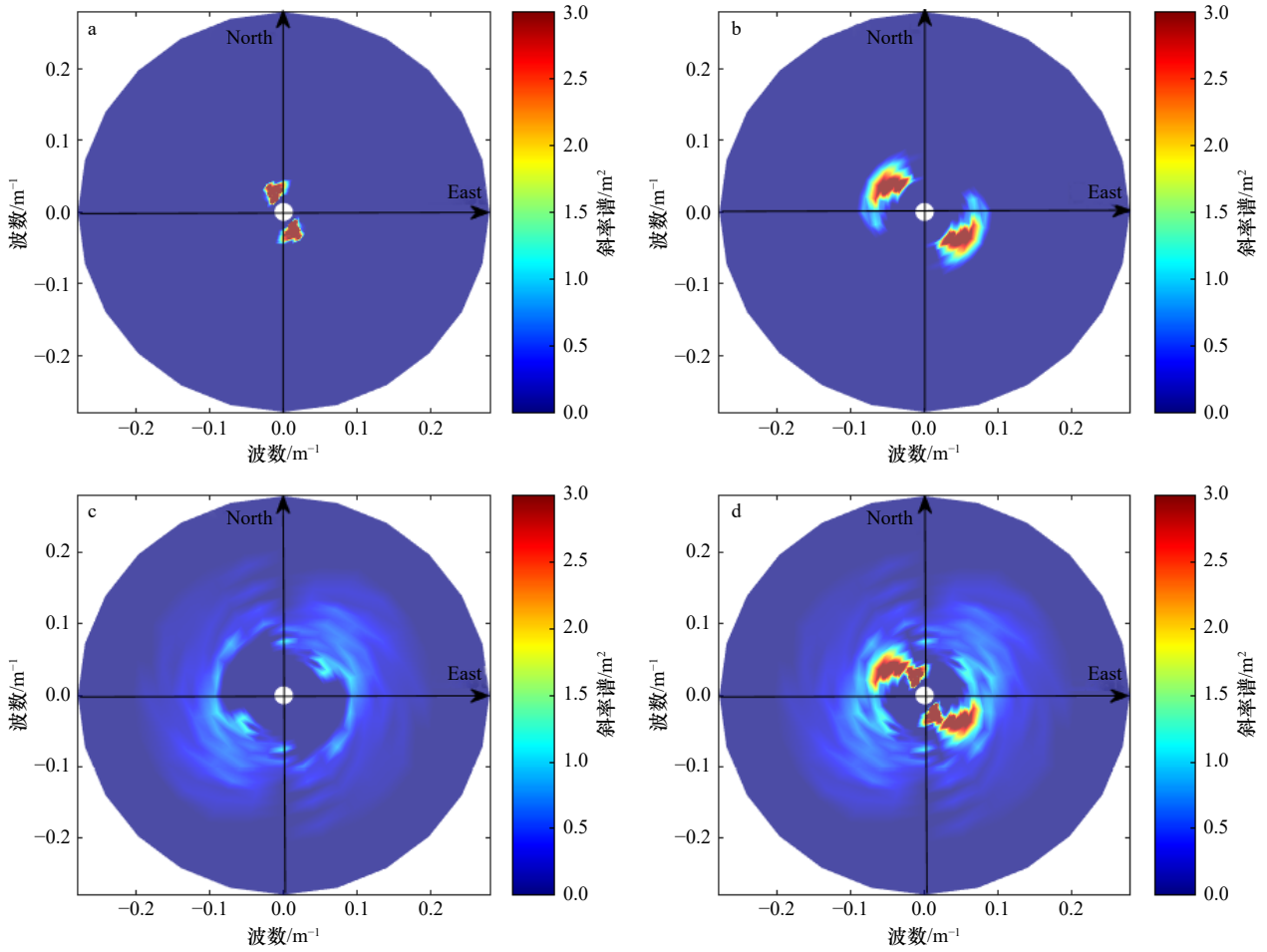

图 1 2022 年 11 月 1 日 4 时 37 分 SWIM 二维谱及分离的 3 个波分量

Fig. 1 The 2D SWIM spectrum and three separated wave components at 04:37 on November 1, 2022

a. 第一波分量，b. 第二波分量，c. 第三波分量，d. 3 个波分量组成的总海浪谱

a. First wave component, b. second wave component, c. third wave component, d. combined spectrum of three components

图 2a 为海浪谱的一维示意图，图中灰色阴影部分为总的一维海浪谱，由红色线表示的两个涌浪波分量和蓝色线表示的一个风浪波分量组成。由风浪和涌浪的性质可知，涌浪是由其他海区的风浪传播而来或是由当地风转向形成，而风浪是由当地风直接作用在海面上形成，因此，二者的传播方向通常和当地风的方向有一定的对应关系。由于 SWIM 海浪谱方向具有 180°模糊，因此对该时刻的风向和各波分量的谱峰波向夹角求余弦，当谱峰波向和风向夹角的余弦值越接近 1，说明该波系统的传播方向和风向更接近，反之则更偏离。结果如图 2b 所示，不同形状的点代表了不同波分量在各个频率上的谱峰波向和风向夹角 θ 的余弦。可以看到，两个涌浪系统在各个频率上的方向夹角余弦值都与 1 相差较远，即谱峰波向与风向有着较大的差距；相反风浪系统的方向夹角余弦值在其位于的频率范围内几乎分布在 $\cos\theta = 1$ 的线上，即该系统的传播方向与风向几乎一致，符合风浪和涌浪的特点，说明使用上述风涌判别方法能够较好地识别风涌浪。

4.2 一维风涌分离结果

将所有数据分别使用 2D 法和 4 种 1D 法进行风涌分离，得到的对比结果如图 3，整体而言，改进的 PM 法分离得到的风浪和涌浪有效波高都和 2D 法的最接近：风浪结果的相关系数为 0.88，涌浪结果的相关系数为 0.85，均为 4 种方法中最高。同时，其均方根误差和偏差都处于相对较低的水平，因此可以认为在不区分海况时，1D 法中改进的 PM 法的分离效果最接近 2D 法。对于 PM 法，图 3a 中有一大部分数据位于

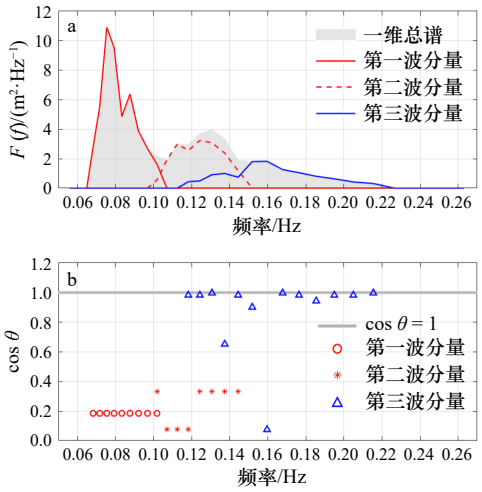

图 2　2022 年 11 月 1 日 04 时 37 分 SWIM 一维谱风涌组成情况

Fig. 2　Wind-sea and swell composition of the 1D SWIM spectrum at 04:37 on November 1, 2022

a. 各波分量一维谱, b. 各频率的峰值波向和风向的余弦值分布

a. 1D spectra of wave components, b. distribution of the cosine of the angle between peak wave direction and wind direction across frequencies

对角线上方, 而图 3e 中一大部分数据位于对角线下方, 即在一定程度上高估了风浪成分而低估了涌浪成分, 这个结果与李水清等[7] 的研究结果相符合。而从图 3b 和 f 可以看到, 改进的 PM 法的分离结果与 PM 法相反, 其低估了风浪成分而高估了涌浪成分。由于 PM 法与改进的 PM 法的区别仅在于分离频率与 PM 谱峰频率之间的比例系数不同, 比例系数取值越大, 分离得到的风浪成分越小, 而涌浪成分越大。显然 PM 法和改进的 PM 法中所取的比例系数都不是最合适的数值。

由图 3c 和 g 可以看到, JP 法的分离结果 Bias 较小, 尽管分离结果与精确值存在一定的偏差, 但在偏大和偏小两个方向上大致平衡, 从而得到较小的偏差值。即说明 JP 法的风涌浪分离精度相对较低, 但基本围绕对角线成对称分布而未表现出高估或低估某一类型海浪的趋势。频谱积分法的风浪和涌浪分离结果都相对较差(图 3d 和 h), 得到的涌浪的有效波高均低于 4 m, 且大部分集中于 2 m 以下, 风浪和涌浪的分离结果均方根误差和偏差的绝对值均大于 1.2 m, 明显高估了风浪能量而低估了涌浪能量。尽管如此, 频谱积分法分离的风浪仍有部分数据较准确地分布在对角线上(见图 3d), 表明在某些情况下频谱积分法也能得到较好的风浪分离结果。

不区分海浪主导情况时的风涌分离结果表明, 4 种 1D 法的分离效果存在明显差异。一些方法总体上分离表现较好, 另一些仅在部分数据上表现出较好的分离效果。为了探究这些差异的原因, 同时分析在某些特定情况下是否存在 1D 法能展现其特定优势, 根据 2D 法分离得到的涌浪能量和风浪能量将混合浪分为风浪占优和涌浪占优两种情形, 进一步再分别细分出纯风浪和纯涌浪两种类型: 当风浪能量大于总能量的 90% 时认为是纯风浪, 涌浪能量大于总能量的 90% 时认为是纯涌浪。即: (1) 纯风浪: $E_{wind}/E_{total} > 90\%$; (2) 风浪为主: $90\% > E_{wind}/E_{total} > 50\%$; (3) 涌浪为主: $90\% > E_{swell}/E_{total} > 50\%$; (4) 纯涌浪: $E_{swell}/E_{total} > 90\%$。对符合以上 4 种情况的数据分别用 2D 法和 4 种 1D 法进行风涌分离, 对其分离结果分别进行分析探讨。

4.2.1　风浪占优时的风涌分离情况

图 4 和图 5 为 4 种 1D 法和 2D 法在风浪占优(风浪为主和纯风浪条件下)时风涌分离结果的比较。当

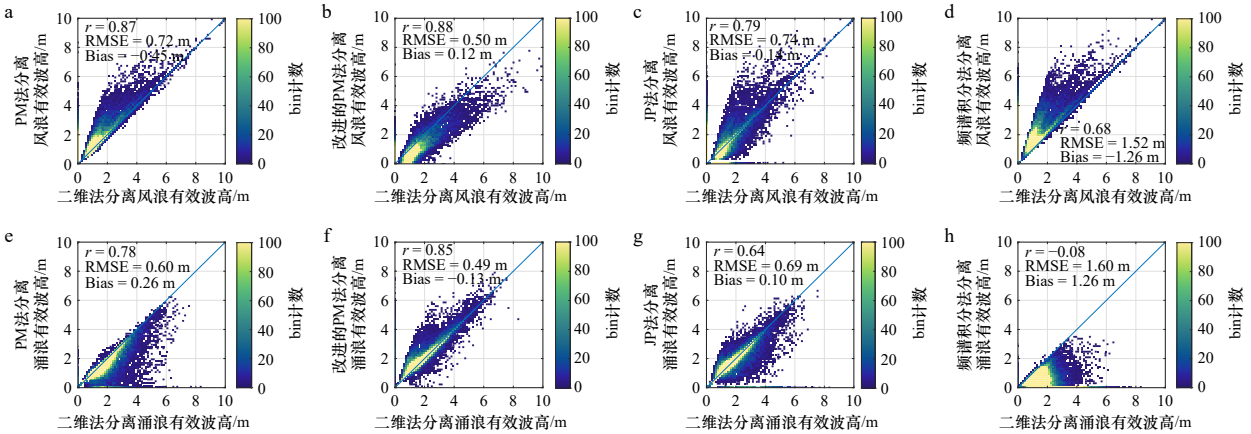

图 3　4 种 1D 法与 2D 法风涌分离结果对比

Fig. 3　Comparison of wind-sea and swell separation results using four 1D methods and 2D method

a、e. PM 法分离结果, b、f. 改进的 PM 法分离结果, c、g. JP 法分离结果, d、h. 频谱积分法分离结果(下同)

a, e. Separation results using PM method; b, f. separation results using improved PM method; c, g. separation results using JP method; d, h. separation results using spectral integral method (similar explanation for the following figures)

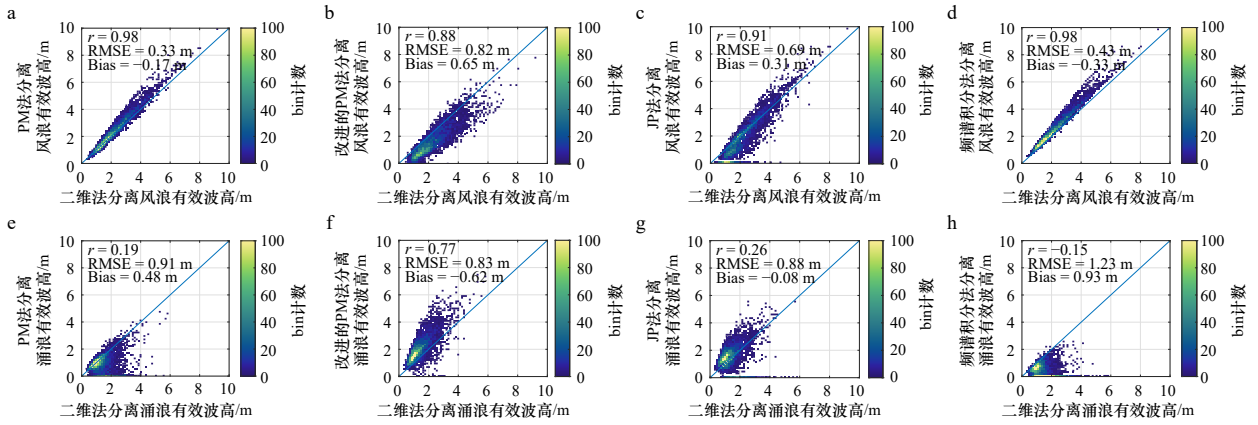

图 4 风浪为主时的风涌分离结果

Fig. 4 Separation results of wind-sea and swell when wind-sea dominates

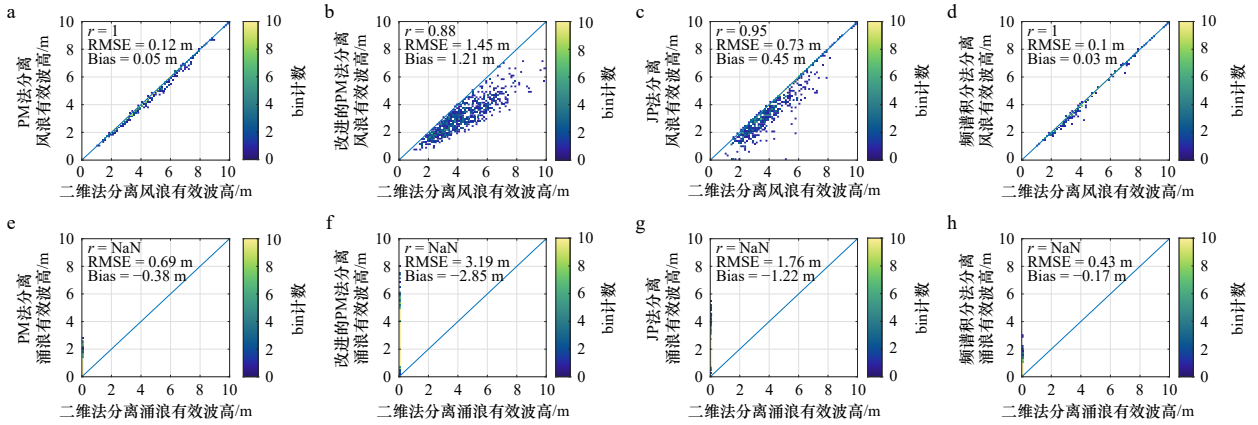

图 5 纯风浪时的风涌分离结果

Fig. 5 Separation results of wind-sea and swell under pure wind-sea conditions

由于二维法分离的涌浪有效波高为 0, 因此 r 为无效值 NaN

Since the significant wave height of swell separated by 2D method is zero, r is NaN (Not a Number)

海浪以风浪为主时, 如图 4 所示, 1D 法分离的风浪误差明显小于涌浪。同时, 风浪为主时分离的风浪有效波高显著高于涌浪的有效波高。通常情况下, 当出现相当大小的绝对误差时, 在测量值偏小的数据中体现出的相对误差要大于总体测量值偏大的数据, 这在 PM 法、JP 法、频谱积分法的分离结果中有明显的表现: 风浪的分离结果效果较好, 而涌浪的分离结果都较差。就风浪的分离结果而言, PM 法和频谱积分法的分离效果较好, 相关系数均为 0.98, 而二者的均方根误差和偏差分别为 0.33 m、−0.17 m 和 0.43 m、−0.33 m, 即 PM 法优于频谱积分法。由图 4d 和图 4h 可以看出频谱积分法一定程度上高估了风浪而低估了涌浪, 且分离的涌浪结果与 2D 法相比差异明显。而改进的 PM 法和 JP 法则相反, 低估了风浪而高估了涌浪, 且二者的分离结果相对较差。

当海浪中的风浪成分进一步增加, 为纯风浪时, 此时 2D 法分离得到的涌浪能量极少或为 0, 而 1D 法有时会分离出少量的涌浪成分, 因此该情况下的涌浪统计指标几乎不具参考意义, 只需关注风浪的分离结果。由分离的风浪结果来看, 频谱积分法的分离结果与 2D 法最接近, 并且相较于风浪为主情况下进一步精确: 相关系数为 1, 均方根误差和偏差分别为 0.1 m 和 0.03 m。其次为 PM 法, 其分离的风浪结果稍差于频谱积分法, 但仍有很高的精度, 相关系数为 1, 均方根误差和偏差分别为 0.12 m 和 0.05 m, 同样是比风浪为主时更加精确。改进的 PM 法和 JP 法的分离结果都有较好的相关性, 但均方根误差和偏差都较大, 误差较明显, 表现出对风浪成分有所低估, 说明这两种方法并不适合用于风浪占优的情况。

由以上两种海浪主导情况的分析可以看出, 当混合浪中的成分由风浪为主变为纯风浪时, PM 法和频谱积分法的分离精度都有所提升, 而改进的 PM 法和 JP 法的分离结果都相对较差。由 PM 法和改进的 PM 法的分离结果差异可以看出, 对于风浪占优的海

浪情况, PM 法使用的比例系数优于改进的 PM 法, 能够得到更加精确的风浪分离结果; 对于 JP 法, 由先前的研究可知[7], 可能对局地风转向形成的涌浪无法判别。同时, 一维波谱通常是由多个独立波系统叠加而成, 意味着每个波峰有可能是由多个波系统的谱值叠加而成的, 从而对依赖于谱峰值判断波浪类型的 JP 法造成影响。对于频谱积分法, 是对波陡法的一种改进, 主要的改进内容体现在将风涌分离频率置于风浪峰值频率之下, 而非风浪峰值频率处。这样的分离原理使得它对风浪有着更高的敏感性, 因此在风浪占优情况下, 也就是风浪特征比其他波浪成分更加明显突出时, 频谱积分法能够更好地展现其分离效果。

4.2.2　涌浪占优的风涌分离情况

当海浪为涌浪占优(包括涌浪为主和纯涌浪)时, 图 6 和图 7 展现了几种方法的风涌分离结果。在该海浪主导条件下, 涌浪成分所占的比例更大, 因此首要关注涌浪的分离结果。由图 6f 可以看出, 改进的 PM 法的涌浪分离结果最接近 2D 法, 相关系数达 0.97, 均方根误差和偏差分别为 0.30 m 和−0.15 m, 但该方法分离的风浪效果一般, 具有一定的相关性但有较为明显的偏差。分离效果其次为 PM 法, 涌浪有效波高相关系数为 0.67, 均方根误差和偏差分别为 0.89 m 和 0.50 m, 但由图 6a 可以看到有相当一部分数据位于对角线的上方, 而在图 6e 中更明显, 几乎大部分数据都位于对角线的下方, 说明 PM 法在该海浪主导情况下低估了涌浪而高估了风浪。同样的, JP 法在该海浪条件下也低估了涌浪而高估了风浪。而频谱积分法在该海浪情况下的分离结果很差, 特别是分离的涌浪成分与 2D 法分离结果差距较大, 相关系数仅为−0.20, 均方根误差和偏差分别为 1.92 m 和 1.49 m, 并且明显的高估了风浪而低估了涌浪。

当海浪主导情况为纯涌浪时, 2D 法分离得到的风浪能量为 0, 因此风浪的分离结果统计指标不作参考。就涌浪的分离结果来看, 改进的 PM 法的分离效

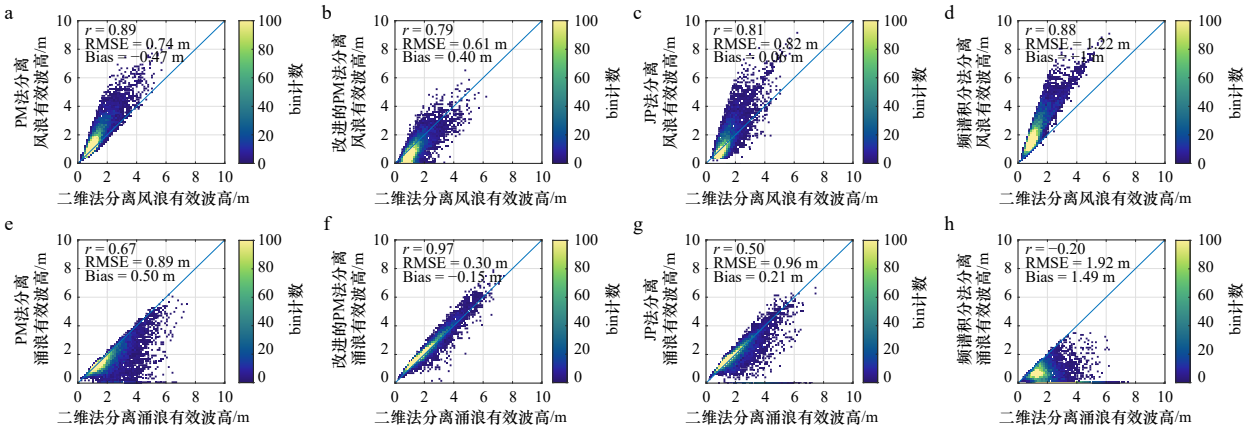

图 6　涌浪为主时的风涌分离结果

Fig. 6　Separation results of wind-sea and swell when swell dominates

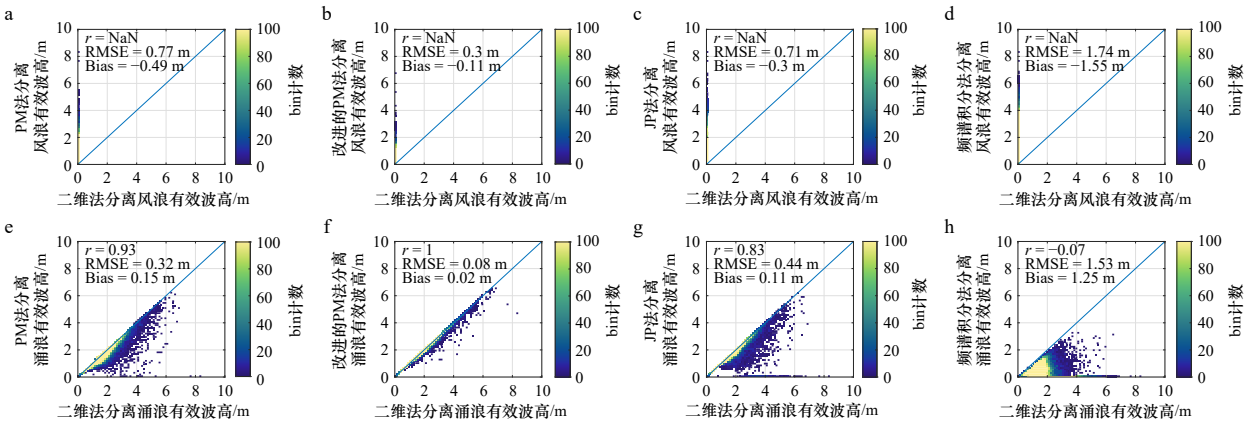

图 7　纯涌浪下的风涌分离结果

Fig. 7　Separation results of wind-sea and swell under pure swell conditions

由于二维法分离的风浪有效波高为 0, 因此 r 为无效值 NaN

Since the significant wave height of wind-sea separated by 2D method is zero, r is NaN (Not a Number)

果最好，其次为 PM 法，但由数据点偏离对角线的方向来看，两种方法都对涌浪有一定程度的低估。由图 7g 可以看到 JP 法分离的涌浪有部分数据分布在 x 轴上，即分离的涌浪能量为零，在纯涌浪条件下得到了纯风浪的结果，说明得到了与 2D 法完全相反的结果。图 7h 可以看到频谱积分法在纯涌浪情况下几乎无法对风浪和涌浪进行分离，明显低估了涌浪。

根据不同 1D 方法在不同海浪组成情况下的分离结果，可见海浪中的风涌主导情况是影响分离效果的重要因素：当混合浪以风浪为主时，PM 法和频谱积分法对风浪成分的分离效果较好，且在风浪成分进一步增加时，二者的分离精度都进一步提高；当混合浪以涌浪为主时，改进的 PM 法对涌浪成分的分离效果最好，同样在涌浪成分进一步增加时，该方法的分离效果进一步精确。由于 PM 法与改进的 PM 法的区别仅在于分离频率与对应 PM 谱峰频率之间比例系数的不同，而二者分别在不同的海浪组成情况下表现出了更优的分离效果。因此，可以合理推断，在不同海浪主导条件下，分别存在不同的比例系数可使 PM 法分离效果达到更佳。

5 分段 PM 法

5.1 分段 PM 法的原理

为了探究不同海浪条件下 PM 法的比例系数取何值时分离效果达到最佳，此处定义一个指数 I[式(15)]，该指数综合考虑了风浪和涌浪分离结果的相关系数（r）、均方根误差（RMSE）和偏差（Bias）3 个方面的信息，以量化使用不同比例系数时分离结果的整体表现。同时，为了确保各项指标处于相同的尺度，将 RMSE 与 Bias 的绝对值进行归一化处理：

$$I = |1-r_{\mathrm{w}}| + |1-r_{\mathrm{s}}| + \mathrm{RMSE}_{\mathrm{n-w}} + \mathrm{RMSE}_{\mathrm{n-s}} + \mathrm{Bias}_{\mathrm{n-w}} + \mathrm{Bias}_{\mathrm{n-s}}, \tag{15}$$

$$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{n}} = \frac{|\mathrm{RMSE}| - \min|\mathrm{RMSE}|}{\max|\mathrm{RMSE}| - \min|\mathrm{RMSE}|}, \tag{16}$$

$$\mathrm{Bias}_{\mathrm{n}} = \frac{|\mathrm{Bias}| - \min|\mathrm{Bias}|}{\max|\mathrm{Bias}| - \min|\mathrm{Bias}|}, \tag{17}$$

其中：r_{w}、$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{n\text{-}w}}$ 和 $\mathrm{Bias}_{\mathrm{n\text{-}w}}$ 分别表示风浪的相关系数、归一化均方根误差和归一化偏差；r_{s}、$\mathrm{RMSE}_{\mathrm{n\text{-}s}}$ 和 $\mathrm{Bias}_{\mathrm{n\text{-}s}}$ 分别表示涌浪的相关系数、归一化均方根误差和归一化偏差。此时，当 I 越小，说明在该比例系数下的相关性越高，误差越小，分离结果越精确。在纯风浪条件下，忽略涌浪成分的统计分析结果，即式(15)仅保留涉及风浪部分。在这种情况下，I 的值随着比例系数的减小而无限趋于 0，出于实际应用的考虑，选取 I 首次小于 0.1 时所对应的比例系数作为最合适的值，纯涌浪条件时同理。而在风浪占优和涌浪占优两种情况下，I 的值同时保留风浪和涌浪的各项统计指标，以确保结果能够同时兼顾风浪和涌浪，此时 I 值最小时所对应的比例系数即该情况下分离精度最高的。

5.2 分段 PM 法的性能验证

图 8 为 4 种海浪情况下的分离结果统计指标随

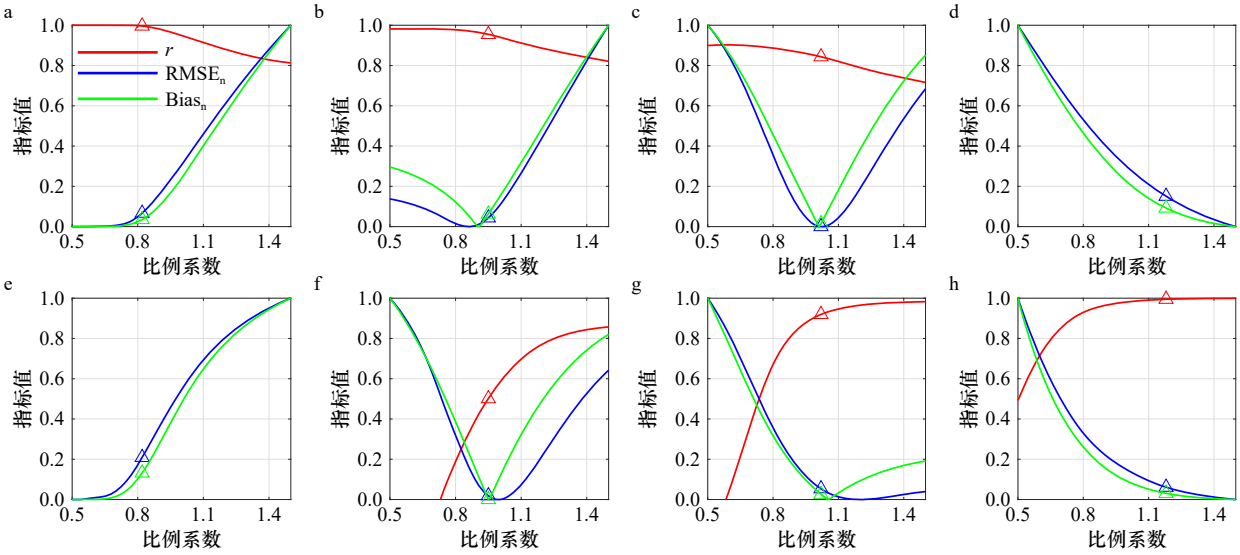

图 8 4 种海浪情况下分离结果的统计指标随比例系数变化的变化情况

Fig. 8 The variation of statistical indicators of separation results under four different wave conditions as the ratio coefficient changes

a、e. 纯风浪时的分离结果；b、f. 风浪为主时的分离结果；c、g. 涌浪为主时的分离结果；d、h. 纯涌浪时的分离结果

a, e. Separation results under pure wind-sea conditions; b, f. separation results when wind-sea dominates; c, g. separation results when swell dominates; d, h. separation results under pure swell conditions

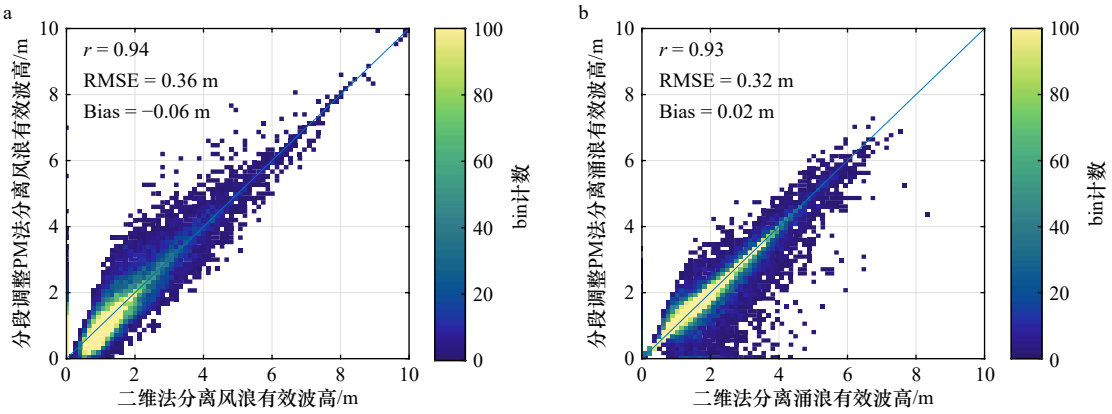

图 9　分段调整比例系数后的 PM 法风涌分离结果

Fig. 9　Separation results of the PM method with piecewise-adjusted ratio coefficients

a. 分离的风浪结果对比; b. 分离的涌浪结果对比(下同)

a. Comparison of separated wind-sea results; b. comparison of separated swell results (similar for the following figures)

比例系数的变化, 可见风浪和涌浪的分离精度随比例系数的变化并不一致, 进一步说明使用指数 I 来选择合适的比例系数是合理的。根据以上定义, 最终得到 4 种海浪主导情况下, PM 法中分离频率与 PM 谱峰频率的比例系数依次取 0.82、0.95、1.02、1.18 时可以达到最佳风涌分离结果。可见 PM 法中的比例系数应当随着混合浪中涌浪占比的增大而增大。在设定的 4 种海浪情况下, 分别使用以上 4 个比例系数的 PM 法进行风涌分离, 得到的结果如图 9, 与一维法中分离效果最好的改进的 PM 法作为对比(见图 3a 和 e), 原本位于对角线上方和下方的数据点更集中地贴合对角线分布。由表 1 的统计值看, 调整比例系数后的 PM 法分离得到的风浪和涌浪的相关系数分别提升至 0.94、0.93, 均方根误差降低为 0.36 m、0.32 m, 偏差降低至−0.06 m、0.02 m。可见分离结果精度得到明显的提升。

以上实验得到了在不同海浪主导条件下寻找 PM 法中分离频率的最佳比例系数对提升风涌分离精度是可行的, 但上述实验是基于 2D 法分离结果得到精确的海浪组成情况, 而在实际使用中, 需要一个可获取混合浪中主导类型的方法, 考虑实际可操作性, 利用波龄来划分不同的海浪组成情况:

$$\beta = \frac{\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}}{U_{10}}, \tag{18}$$

其中, λ 为波长。在这里, 波龄的取值与前文 2D 中的波龄保持一致, 当波龄小于 1.5 时, 海浪以风浪为主导, 反之以涌浪为主导。针对得到的两种海况, 跟据指数 I 的定义选取最合适的比例系数, 得到在风浪主导和涌浪主导的情况下最佳比例系数分别为 1.03、1.1, 并定义该方法为分段 PM 法。使用分段 PM 法的分离结果如图 10 所示, 数据点同样更集中地分布在对角线上, 分离得到的风浪和涌浪相关系数分别提升到 0.90、0.88, 均方根误差降至 0.46 m、0.42 m, 偏差降低至−0.03 m、−0.04 m。可见在实际使用中, 同样可以通过调整不同海浪主导情况下 PM 法的比例系数得到比其他 1D 法更精确的风涌分离结果(表 2)。

表 1　分段调整比例系数后的 PM 法与其他 PM 法的风涌分离结果比较

Table 1　Comparison of separation results between the piecewise-adjusted PM method and other PM methods

	r	RMSE/m	Bias/m
原始的PM法(风/涌)	0.87/0.78	0.72/0.60	−0.45/0.26
改进的PM法(风/涌)	0.88/0.85	0.50/0.49	0.12/−0.13
分段调整PM法后(风/涌)	0.94/0.93	0.36/0.32	−0.06/0.02

6　结论

本文基于 SWIM 二维海浪谱及其划分的波分量信息, 通过将能量占比最大的 3 个波分量组合成一个总谱, 构建成一个海浪谱数据模型, 以此去除噪声和寄生波峰的影响。对其分别使用 2D 法和 4 种 1D 法进行风涌浪分离结果比较, 得到在不区分海浪主导情况时, 改进的 PM 法的分离结果与 2D 法的结果更为接近。分离效果其次的为 PM 法, 但其明显低估了风浪而高估了涌浪; JP 法和频谱积分法的分离精度较差, 但仍有少部分数据能有较好的分离结果。利用 2D 法分离得到的风浪和涌浪能量, 本文将混合浪分为纯风浪、风浪为主、涌浪为主和纯涌浪 4 种海浪主导情况, 分别使用 4 种 1D 法进行风涌分离结果对

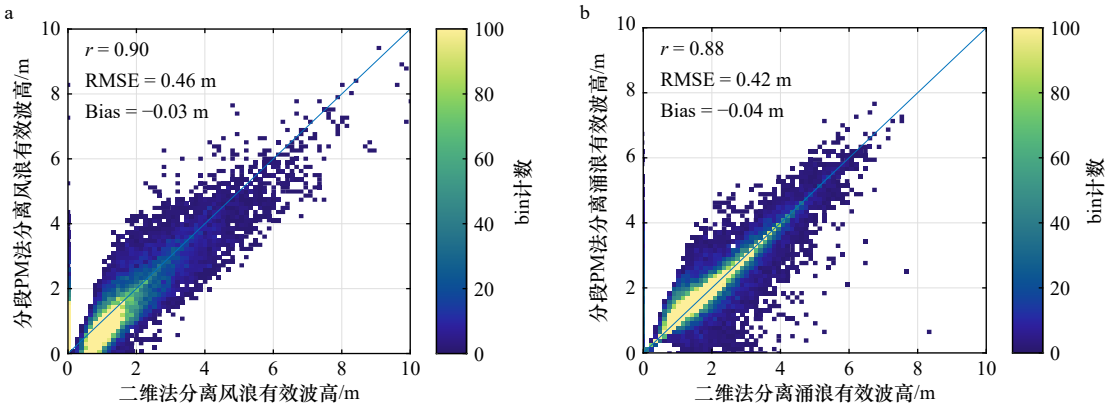

图 10 分段 PM 法的风涌分离结果

Fig. 10 Separation results of wind-sea and swell using the piecewise PM method

表 2 分段 PM 法与其他 PM 法的风涌分离结果比较

Table 2 Comparison of separation results between Piecewise PM Method and other PM Methods

	r	RMSE/m	Bias/m
原始的PM法(风/涌)	0.87/0.78	0.72/0.60	−0.45/0.26
改进的PM法(风/涌)	0.88/0.85	0.50/0.49	0.12/−0.13
分段PM法(风/涌)	0.90/0.88	0.46/0.42	−0.03/−0.04

比。分析得到 JP 法的分离结果总体较差，可能与其在风向变化时的失效、1D 谱中谱峰叠加的复杂性有关；频谱积分法在风浪占优时表现出明显的优势，而在涌浪占优时几乎失效，这可能与其对风浪更高的敏感性有关；对于 PM 法和改进的 PM 法，二者分别在风浪占优和涌浪占优两种情形下分别表现出了更好的分离结果，说明在不同的海浪主导情况下取不同的比例系数能使 PM 法的分离精度更精确。

根据以上结论，对不同海浪主导情况下能够使 PM 法达到最佳分离效果的比例系数进行讨论，得到在纯风浪、风浪为主、涌浪为主和纯涌浪情况下分别使用比例系数为 0.82、0.95、1.02 和 1.18 时能够使分离精度达到最佳，与 2D 法的分离结果相比，风浪有效波高的相关系数、均方根误差和偏差分别为 0.94、0.36 m 和−0.06 m，涌浪的则为 0.93、0.32 m 和 0.02 m。在此基础上提出了不同海浪主导条件下使用不同比例系数的分段 PM 法：首先利用波龄将海况分为风浪主导和涌浪主导两种类型，再分析得到分别使用比例系数为 1.03 和 1.1 时可以得到最佳风涌分离效果，分离结果与 2D 法相比，风浪有效波高的相关系数、均方根误差和偏差分别为 0.90、0.46m 和−0.03 m，涌浪的为 0.88、0.42 m 和−0.04 m，与其他 1D 法相比精度有所提升。

致谢： CFOSAT SWIM 数据来自网站：https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/wind/wave-products/wave-wind-cfosat-products.html，感谢 AVISO+网站对本文数据的支持。

参考文献：

[1] 冯士筰, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 198.
Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. An Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 198.

[2] 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.
Zhou Yandong, Lei Zhenming, Sun Guomin, et al. A review on basic theory research of swell[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2016, 37(1): 1−6.

[3] 汪炳祥, 常瑞芳, 王一飞. 风浪与涌浪的划分判据[J]. 黄渤海海洋, 1990, 8(1): 16−24.
Wang Bingxiang, Chang Ruifang, Wang Yifei. Criteria of differentiating swell from wind waves[J]. Journal of Oceanography of Huang-hai & Bohai Seas, 1990, 8(1): 16−24.

[4] 郭佩芳, 施平, 王华, 等. 划分风浪与涌浪的一个新判据——海浪成份及其在南海的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(2): 131−137.
Guo Peifang, Shi Ping, Wang Hua, et al. A new criterion between wind wave and swell wave: by mixed wave composition factors and its application to the south China sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1997, 27(2): 131−137.

[5] 郭佩芳, 施平, 王华, 等. 混合浪成分及其在西北太平洋海域的应用[J]. 海洋湖沼通报, 1996(3): 1−6.
Guo Peifang, Shi Ping, Wang Hua, et al. Wave composition and its application on north-western pacific[J]. Transactions of Oceanology

and Limnology, 1996(3): 1−6.
[6] Hanley K E, Belcher S E, Sullivan P P. A global climatology of wind–wave interaction[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(6): 1263−1282.
[7] 李水清, 赵栋梁. 风浪和涌浪分离方法的比较[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 23−29.
Li Shuiqing, Zhao Dongliang. Comparisons on partitioning techniques to identify wind-wave and swell[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(2): 23−29.
[8] Wang D W, Hwang P A. An operational method for separating wind sea and swell from ocean wave spectra[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2001, 18(12): 2052−2062.
[9] Hwang P A, Ocampo-Torres F J, García-Nava H. Wind sea and swell separation of 1D wave spectrum by a spectrum integration method[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(1): 116−128.
[10] Portilla J, Ocampo-Torres F J, Monbaliu J. Spectral partitioning and identification of wind sea and swell[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(1): 107−122.
[11] 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 Yinan, Tao Aifeng, Li Xueding, et al. Study on separation method of wind-wave and swell in the Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(11): 25−34.
[12] Liu Yan, Hao Zengzhou, Gong Fang, et al. Spectral separation of wind sea and swell based on buoy observations[C]//Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2015. Toulouse: SPIE, 2015, 9638: 185−197.
[13] Tison C, Hauser D. SWIM products users guide[R]. Toulouse: CNES, 2019. CF-GSFR-MU-2530-CNES.
[14] Jiang Haoyu, Song Yuhao, Mironov A, et al. Accurate mean wave period from SWIM instrument on-board CFOSAT[J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 280: 113149.
[15] Xu Ying, Hauser D, Liu Jiangqiang, et al. Statistical comparison of ocean wave directional spectra derived from SWIM/CFOSAT satellite observations and from buoy observations[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1−20.
[16] Aouf L, Dalphinet A, Hauser D, et al. On the assimilation of CFOSAT wave data in the wave model MFWAM: Verification phase[C]//IGARSS 2019−2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE, 2019: 7959−7961.
[17] Jiang Haoyu, Mironov A, Ren Lin, et al. Validation of wave spectral partitions from SWIM instrument on-board CFOSAT against in situ data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 1−13.
[18] 文圣常, 余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 135.
Wen Shengchang, Yu Zhouwen. Wave Theory and Computational Principles[M]. Beijing: Science Press, 1984: 135.
[19] 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.

Study on separation method for one-dimensional wind-sea and swell under different dominant wave conditions

Wei Yongliang[1], Pang Denglian[1], Gao Zhiyi[2], Tang Zeyan[3]

(1. *College of Oceanography and Ecological Science*, *Shanghai Ocean University*, *Shanghai* 201306, *China*; 2. *National Marine Environmental Forecasting Center*, *Beijing* 100081, *China*; 3. *East China Sea Development Research Center*, *Ministry of Natural Resources*, *Shanghai* 201306, *China*)

Abstract: Mixed waves in the ocean typically consist of wind-sea and swell in varying proportions. Separation of wind-sea and swell components is frequently required for research or operational purposes. This paper focuses on four existing representative one-dimensional spectral wind-sea and swell separation methods (1D methods): the PM method (Pierson-Moskowitz), the improved PM method, the JP method (Jesús-Portilla), and the spectral integral method. Using two-dimensional wave spectrum data provided by the spectrometer onboard the China-France Oceanography Satellite, a comparative analysis of the separation results under four wave-dominant conditions—pure wind-sea, wind-sea-dominant, swell-dominant, and pure swell—was conducted. The results show that: (1) The PM method and the improved PM method perform better under wind-sea-dominant and swell-dominant conditions, re-

spectively. (2) The JP method performs poorly overall and is insensitive to different wave-dominant conditions; the spectral integral method performs better when wind-sea dominate. (3) As the proportion of swell in mixed waves increases, appropriately increasing the frequency ratio coefficient in the PM method can improve separation accuracy. Based on this, a piecewise PM method considering wave age is proposed. By adjusting the proportional coefficient of the separation frequency to 1.03 for wind-sea-dominated conditions and 1.1 for swell-dominated conditions, the separation results obtained are more accurate.

Key words: wave-dominant conditions; wind-sea and swell separation; China-France Oceanography SATellite; wave spectrum