

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.014

双峰谱波浪在西非典型海滩上的传播变形与演化特性

张 凯^{1,2}, 王广生³, 时 健^{1,2}, 鱼 童³, 张 弛^{1,2}

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要: 基于实测波浪数据得到了西非典型的双峰谱, 通过物理模型试验研究了在不同风浪、涌浪能量占比的条件下, 不规则波浪在典型海滩上的传播变形与波谱演化特性。结果表明: 双峰谱波浪在有效波高变化、谱峰能量变化和非线性作用等方面与单峰谱波浪存在显著差异; 双峰谱波浪的有效波高增大主要由低频涌浪部分的波浪浅化主导, 涌浪能量占比增大会导致波浪破碎前的最大波高增大; 相比于单峰谱涌浪, 双峰谱波浪的涌浪谱峰在沙滩上传播中的能量增长更快, 波浪破碎后的涌浪谱峰能量衰减更慢; 涌浪和风浪主峰之间的非线性作用产生了由高频风浪部分至低频涌浪部分的能量转移, 使得双峰谱中的涌浪主峰能量相对增大。

关键词: 双峰谱; 波谱演化; 涌浪; 风浪; 非线性作用; 西非

中图分类号: P731.22; TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2025)03-0109-09

Transformation, deformation, and evolution characteristics of bimodal spectral waves on typical beach of West Africa

ZHANG Kai^{1,2}, WANG Guangsheng³, SHI Jian^{1,2}, YU Tong³, ZHANG Chi^{1,2}

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. China Harbour Engineering Company Limited, Beijing 100027, China)

Abstract: A typical bimodal spectrum in West Africa was obtained based on the measured wave data, and the transformation, deformation, and spectral evolution characteristics of irregular waves on typical beaches under the conditions of different energy proportions of wind waves and swells were studied through physical model experiments. The results demonstrate significant differences between bimodal spectral waves and unimodal spectral waves in terms of significant wave height variation, spectral peak energy evolution, and nonlinear interaction. The increase in the significant wave height for bimodal spectral waves is primarily governed by the shoaling process of low-frequency swell components, with higher swell proportion leading to larger maximum wave height before wave breaking. Compared to unimodal spectral swell, the swell spectral peak of bimodal spectral waves exhibits faster energy growth during transformation and slower energy dissipation after wave breaking. Nonlinear interaction between swell and wind wave spectral peaks induces energy transfer from high-frequency wind wave components to low-frequency swell components, resulting in relative energy growth of the swell spectral peak in bimodal wave spectrum.

Key words: bimodal spectrum; spectral evolution; swell; wind wave; nonlinear interaction; West Africa

波浪是影响近岸工程的关键水动力因素之一, 大量观测资料的统计结果表明, 波浪并不只以单独一种形式呈现, 还会以风浪、涌浪的混合形式出现。混合浪的频谱结构复杂多样, 多为双峰谱, 普遍存在于我国东南沿海地区^[1-2]及印度洋北岸、西非海域、北大西洋、欧洲北海等地^[3-7], 而且在风暴期间出现双峰谱波浪的概率更高。

双峰谱波浪中的涌浪成分由于其相较风浪较长的周期, 在波浪能量分布、波高统计特性等方面与常规风

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项项目(2023YFE0126300)

作者简介: 张凯(1999—), 男, 博士研究生, 主要从事海岸波浪研究。E-mail: zhangkai1999@hhu.edu.cn

通信作者: 时健(1987—), 男, 副教授, 博士, 主要从事台风浪模拟与岛礁动力过程研究。E-mail: jianshi@hhu.edu.cn

引用本文: 张凯, 王广生, 时健, 等. 双峰谱波浪在西非典型海滩上的传播变形与演化特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 109-117.

ZHANG Kai, WANG Guangsheng, SHI Jian, et al. Transformation, deformation, and evolution characteristics of bimodal spectral waves on typical beach profiles of West Africa[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(3): 109-117.

浪存在差异。双峰谱能量分布幅度更宽,瑞利分布描述波高分布效果不佳,有效波高小于理论值^[8]。由于波浪的非线性作用,波要素的变化也影响了底部波流速^[9]和波浪作用力^[10]。双峰谱波浪特征对港湾共振、海堤越浪、堤前反射、船舶运动等也有着重要的影响。邓蓄^[11]模拟了双峰谱波浪作用下港湾内水域响应状况,指出低频能量的不断积累会引起港湾内局部水域出现剧烈的振荡现象。Orimoloye 等^[12-14]针对斜坡防波堤的稳定性、波浪反射特性以及越浪量等进行了研究,指出在波谱总能量接近的情况下,双峰谱波浪越浪量以及反射系数相比纯风浪更大。陈汉宝等^[15]通过水槽实验,发现双峰谱波浪的越浪量主要由长周期波浪推高波浪爬高引起,大于统计周期相同的单峰谱波浪,更接近于长周期波浪的越浪量。潘毅等^[16]在后续研究中,针对单个波浪溢流引起的越堤流量提出了更加准确的经验公式。史宪莹^[17]研究了双峰谱波浪对系泊船舶运动的作用,指出波浪总能量相同时双峰谱波浪作用下的系泊船舶运动响应远大于单峰谱风浪。

波谱理论研究以单峰谱为基础,包括开阔海域充分发展的 P-M 谱^[18]和不完全发展的 JONSWAP 谱^[19]。在对 JONSWAP 谱公式进行不断改进之后^[20],以波高、周期、谱峰尖度为参数的三参数波谱在海岸工程领域得到了广泛的应用。Strekalov 等^[21]首先提出了用不同方式分别拟合双峰谱波浪的低频峰和低频峰成分;Ochi 等^[22]将双峰谱波浪的高频、低频分谱用两个调整后的 P-M 谱叠加,以两个分谱的有效波高、谱峰周期、形状参数组合成一个六参数双峰谱;Soares^[23]基于北大西洋和北海的波浪观测数据用两个 JONSWAP 分谱去拟合双峰谱波浪,提出了以分谱的有效波高、平均周期组合成的四参数双峰谱;Torsethaugen 等^[24-25]基于挪威大陆架的实测波浪数据,以 JONSWAP 谱为基础提出了多参数双峰谱,并且简化了对风浪、涌浪的参数描述;Akbari 等^[26]基于印度洋北部阿曼湾的观测数据,给出了提高双峰谱精度的一种校准方法。由于海域内涌浪特征的差异,不同的双峰谱适用于不同的海域,需要依据实际海域波况选择^[27]。

在波浪传播变形特性规律的研究中,非线性作用是控制波谱演化、能量转移的关键因素。针对双峰谱波浪的研究大多集中在波谱表达、统计规律分析、近岸结构物相互作用等方面。对于波浪传播变形与波谱能量演化机制的研究,通常考虑的是规则波或者单峰谱波浪,而考虑双峰谱波浪的研究则相对较少。Herbers 等^[28]通过现场观测研究了天然海滩上破碎波浪的波谱能量平衡关系,观察到波谱中不同频率成分之间的非线性能量转移。赵建^[29]通过分析南海波浪浮标数据,采用数值模拟和物理模型试验的方式对近岸岛礁上的双峰谱波浪进行了研究,指出双峰谱中存在高频能量向低频能量转移的整体趋势。Liu 等^[30]研究了南海珊瑚岛礁附近的波谱数据,指出双峰波谱的产生存在两种因素,波浪浅水的非线性作用使得平均高频谱峰接近低频的 2 倍。Ricondo 等^[31-32]提出了一种快速模拟单峰谱条件下波浪近岸传播过程的方法,并将其拓展到了更普遍的双峰谱海况。Villefer 等^[33]考察了波谱数值模型在风浪、涌浪混合海况下的模拟结果和实验室观测结果的一致性,发现长周期涌浪的存在使得风浪谱峰频率下降。

关于波浪在海滩上传播变形的研究大多基于现场观测或者单峰谱波浪情形,而基于单峰谱波浪的研究对双峰谱的适用性有限。在西非几内亚湾海域内大西洋涌浪与当地风浪混合,波谱以双峰谱形式为主^[4]。考虑双峰谱波浪的有效波高变化以及双峰谱内风浪、涌浪之间的非线性作用机制,本文结合西非典型海滩剖面与当地实测波浪数据,开展了水槽物理模型试验,研究了双峰谱波浪在海滩上的传播变形与非线性波谱演化特性,以期西非海岸港口建设和岸滩保护提供参考。

1 试验方法

1.1 双峰谱的设置

双峰谱以 Ochi-Hubble 六参数双峰谱^[22]和 Soares 四参数双峰谱^[23]为理论基础,以两个单峰谱分别拟合双峰谱波浪的涌浪、风浪分谱,再组合成一个双峰谱:

$$S_b(f) = S_s(f) + S_w(f) \tag{1}$$

式中: $S_b(f)$ 为双峰谱; $S_s(f)$ 为涌浪分谱; $S_w(f)$ 为风浪分谱。考虑到波浪在西非海滩上传播时,大部分情况下双峰谱波浪都处于近岸浅水区域,故选择适合近岸的 JONSWAP 谱为作为单峰谱。两个分谱的拟合参数包括有效波高 H 、谱峰周期 T 和尖度因子 γ ,根据西非加纳海域水动力现场观测的波浪数据确定。

加纳海域位于几内亚湾北岸,西邻科特迪瓦,北接布基纳法索,东毗多哥,南濒大西洋,处于几内亚湾的关键位置。双峰谱参数以较深水深处的波浪数据为参考,持续观测 2 月,平均水深为 8.50 m,其他波浪统计数据见表 1。日均数据的波周期的波动变化说明,当地双峰谱波浪中涌浪的强度会产生周期性的变化。几

内亚湾地区的涌浪来自南大西洋海域,不受当地风的影响^[34],周期性的增强与衰减与来源地的波浪形成相关,独立于当地的风浪变化,是非常典型的双峰谱波浪主导海域。观测时段的平均波谱如图 1(a) 所示,呈现出明显的双峰形态,其中低频涌浪成分仍然占据能量主导地位。在双峰谱拟合中,通过调整参数 H 、 T 和 γ 使得涌浪分谱和风浪分谱叠加后的双峰谱尽可能接近实际测量结果,如图 1(b) 所示。双峰谱中涌浪分谱参数为 $H=0.71\text{ m}$ 、 $T=12.0\text{ s}$ 、 $\gamma=1.5$,风浪分谱参数为 $H=0.53\text{ m}$ 、 $T=6.6\text{ s}$ 、 $\gamma=2.2$ 。

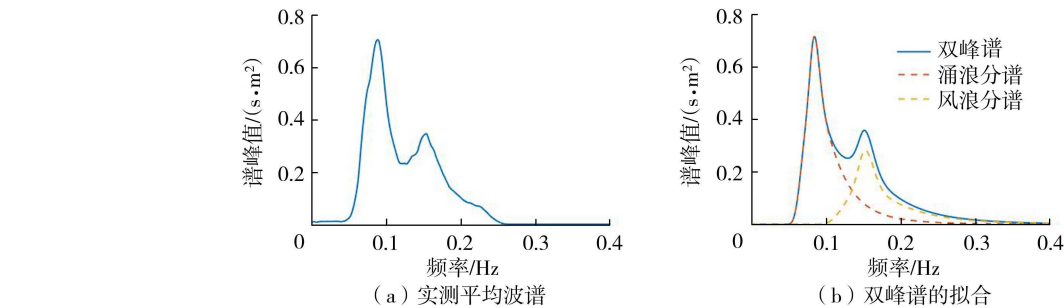


图1 观测时段的平均波谱

Fig.1 Average wave spectrum during observations

1.2 试验设计

物理模型试验在河海大学港口航道工程与海岸科学实验中心进行,波浪水槽主体长度为 60 m,宽度为 1 m,高度为 1.3 m,两端分别设有推板式造波机和消波板,造波机可以根据输入的波谱参数生成单向的不规则波。根据西非典型海滩剖面的实测剖面数据,设置了 3 个物理模型分别对应陡坡海滩、斜坡海滩、带沙坝缓坡海滩 3 种不同的海滩。其中,斜坡上的沙坝位置水深对应常浪高度下主要波浪破碎位置的水深^[35]。

试验总体布置如图 2 所示,在斜坡上布置电容式浪高仪采集波面高程数据,斜坡模型采用不透水的定床模型,相比于沙砾斜坡海床模型^[36],波能耗散更小,波浪浅水变形更明显,所以试验地形的摩擦阻力小于现场实际地形的摩擦阻力。

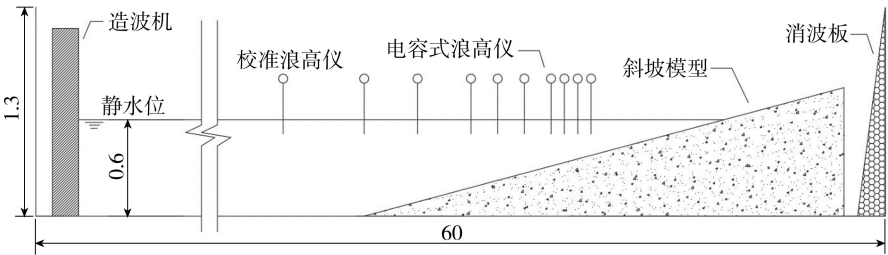


图2 波浪水槽试验总体布置(单位:m)

Fig.2 Experimental setup in wave flume (unit: m)

根据对西非多年波浪数据的再分析结果,在常浪条件下有效波高范围为 0.75~1.75 m,极端波浪条件下最大有效波高可达 3.1 m^[37]。结合实验室波浪水槽的尺寸,在试验中采用 1:25 的几何比尺和 1:5 的时间比尺,设置入射有效波高 $H_0=2、8、4\text{ cm}$ 对应的 3 种波浪海况的不同工况。在 1:5 的时间比尺下,双峰谱中涌浪分谱的谱峰频率 $f_s=0.42\text{ Hz}$,风浪分谱的谱峰频率 $f_w=0.76\text{ Hz}$ 。

由于涌浪的来源与当地风浪的来源不同,涌浪的增强与衰减变化与风浪不同步,两者的波谱能量变化相互独立。以平均波谱作为当地的典型波谱,通过风浪分谱、涌浪分谱的能量变化反应波周期变化中不同类型的当地波谱。本文试验以涌浪分谱能量占波谱总能量的比值即涌浪能量占比来区分不同类型的波谱:

$$P = H_s^2 / (H_s^2 + H_w^2)$$

(2)

式中: P 为涌浪能量占比; H_s 为涌浪分谱的有效波高; H_w 为风浪分谱的有效波高。通过调整双峰谱中涌浪分

谱和风浪分谱有效波高的比值来控制两个分谱在波谱总能量中的占比。试验中以涌浪能量占比 0.25 为一个梯度,设置了 5 种不同的不规则波浪波谱的工况,不同试验工况的参数设置如表 2 所示。使用校准浪高仪测量的数据对入射波谱进行校正,以风浪主导和涌浪主导的双峰谱为例,试验中实际波谱与设计工况的理论波谱对比如图 3 所示,谱峰频率和波谱中涌浪能量占比的误差符合研究要求。

表 2 试验工况的参数设置			
Table 2 Parameters settings of test conditions			
工况	有效波高/cm	涌浪能量占比	类型
1	12、8、4	1	涌浪单峰谱
2	12、8、4	0.75	涌浪主导的双峰谱
3	12、8、4	0.5	风、涌浪均衡的双峰谱
4	12、8、4	0.25	风浪主导的双峰谱
5	12、8、4	0	风浪单峰谱

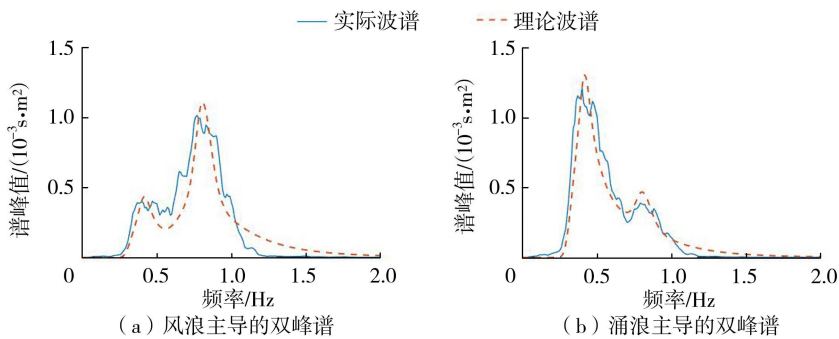


图 3 实际波谱与理论波谱对比 ($H_0=8\text{ cm}$)

Fig. 3 Comparison between actual and theoretical wave spectrums ($H_0=8\text{ cm}$)

2 试验结果与分析

2.1 有效波高的沿程变化

不同工况的涌浪能量占比变化对有效波高沿程分布的影响如图 4 所示,有效波高根据浪高仪数据,采用跨零点法计算。从图 4 可以看出,入射有效波高 H_0 相同时涌浪单峰谱情况下,不规则波浪在斜坡上传播至波浪破碎之前有着更大的有效波高。而在 3 种双峰谱情况下,涌浪能量占比的提高也会使最大有效波高增大。相对于风浪,涌浪的波长和周期更长,浅水变形效应更为明显。因此在双峰谱条件下,波长、周期往往介于单峰的风浪分谱和涌浪分谱之间,波谱中涌浪能量占比提高使得浅水变形效应更明显,所以破碎有效波高也会逐步增大。从波谱总能量的角度来看,双峰谱波浪的演变是与单峰谱相似的。有效波高的增大主要由水深和涌浪能量占比控制,涌浪能量占比越大,有效波高开始增大的水深也更大。

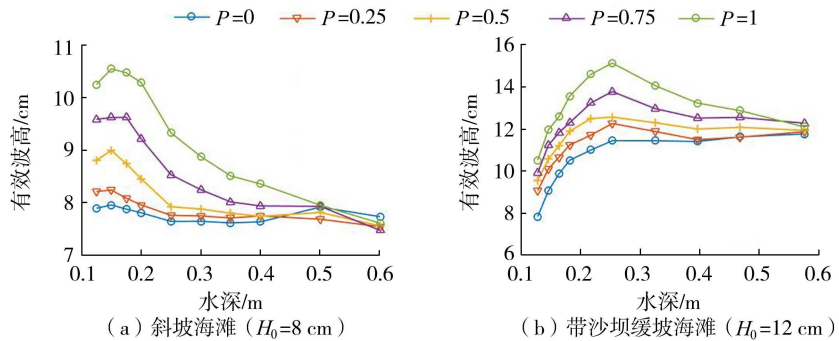


图 4 有效波高在不同水深处的分布

Fig. 4 Distribution of significant wave heights at different water depths

在不同工况的试验中,不规则波浪的大波破碎水深主要受到入射有效波高的影响,而涌浪能量占比的变化对破碎水深的影响不明显。对于不同涌浪能量占比的波谱,有效波高变化的转折点位置的水深接近(图 4),波浪破碎主要受有效波高与水深的比值 H_s/h (波高水深比) 限制,波浪破碎时波高水深比在 0.55~0.65 之间,涌浪能量占比越大波高水深比越大,且涌浪单峰谱(绿线)情况下的最大有效波高约为风浪单峰谱(蓝线)情况下的 1.3 倍。

2.2 谱峰能量的变化

从波谱能量变化的角度分析涌浪能量占比增大对有效波高沿程变化的影响,图 5 为斜坡海滩地形上相同入射有效波高($H_0=12\text{ cm}$)工况下,涌浪单峰谱($P=1$)与双峰谱($P=0.5$)的波谱能量分布在不同水深处的变化。在浅水变形区间(水深 $0.60\sim0.30\text{ m}$),有效波高的增大反映为波谱能量的总体增大,在 $P=1$ 时涌浪主峰收窄,谱峰基本不变,且在 2 倍于主峰频率的次峰中出现了明显的增长,使得波谱能量总体增大;在 $P=0.5$ 时涌浪主峰能量显著增大,而风浪主峰能量却出现了较为明显的衰减,退化为双峰谱中的次峰。两种情况下的涌浪在浅水变形中的主导因素不同。

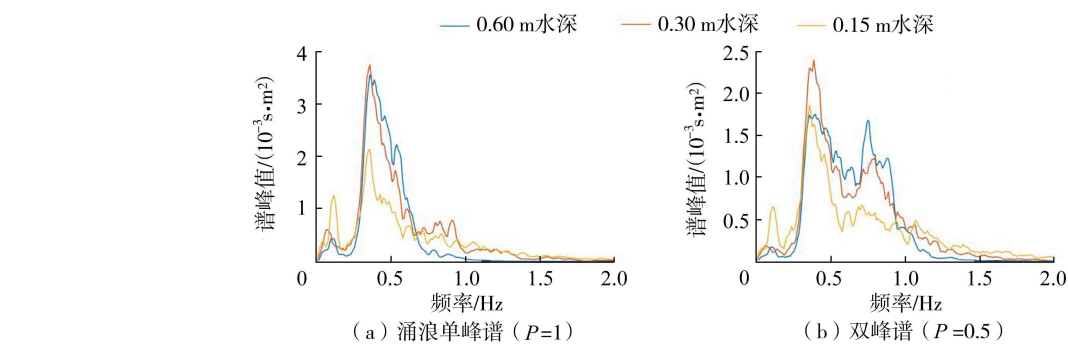


图 5 斜坡海滩地形上波谱能量随水深的变化 ($H_0=12\text{ cm}$)

Fig. 5 Spectral energy variation with water depth on slope beach profile ($H_0=12\text{ cm}$)

当 $P=0.5$ 时,风浪和涌浪谱峰能量在波谱总能量中的占比如图 6 所示,涌浪和风浪的谱峰能量计算范围均取 $0.9\sim1.1$ 倍的谱峰频率。在不同的海滩地形上入射有效波高相同的情况下,涌浪和风浪的谱峰初始能量基本相同,但随着水深减小涌浪谱峰能量占比增大,而风浪谱峰能量占比则有明显的降低。这也说明了对于双峰谱波浪,涌浪部分主导了有效波高的增大(图 4),且涌浪在双峰谱波浪中的主导作用随着涌浪能量占比的增大而增强。相比而言,单峰谱波浪的谱峰能量在波谱总能量中的占比都随着水深的变浅而降低,与主峰收窄和次峰增长有关(图 5(a))。

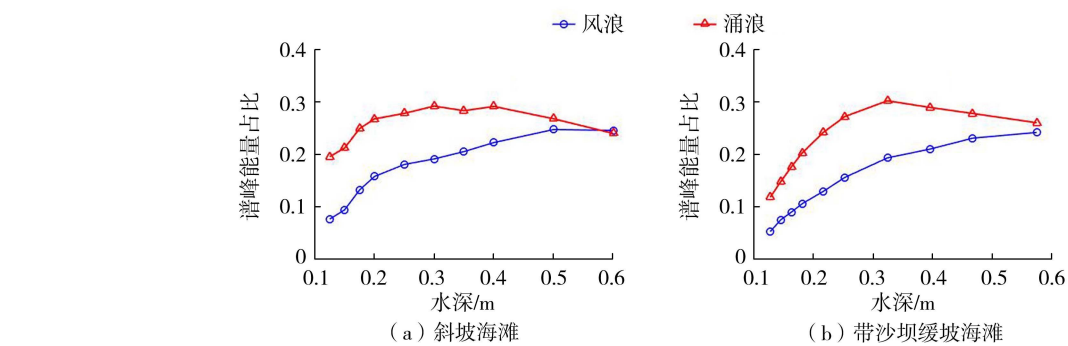


图 6 谱峰能量占比随水深的变化 ($H_0=12\text{ cm}$)

Fig. 6 Variation of spectral peak energy proportion with water depth ($H_0=12\text{ cm}$)

2.3 双峰谱的演化差异

在试验的双峰谱设置中,采用的是分别拟合涌浪分谱 $S_s(f)$ 与风浪分谱 $S_w(f)$ 的方法^[21-23],将两个分谱叠加后得到原始的双峰谱 $S_b(f)$ (图 1(b))。在双峰谱波浪中,涌浪和风浪是同时存在的,这一点与传统的单峰谱的演化不同。考虑两个分谱($S_s(f)$ 和 $S_w(f)$)都以单峰谱的形式独立存在,两者在相同的持续时间 T 上互不重合,在海滩斜坡上传播时属于单峰谱波浪;在两个分谱的总持续时间 $2T$ 内取平均波谱得到两个单峰谱的叠加波谱 $S_{s+w}(f)$ 。与双峰谱相比,叠加波谱初始状态的波高和周期的统计参数相同,但是在海滩上传播的过程中,随着时间的演化而逐渐出现明显差异。以带沙坝缓坡海滩地形上 $H_0=12\text{ cm}$ 的工况为例,在海滩坡脚前的入射波谱(图 7(a))对比表明双峰谱与叠加波谱的拟合度较高,试验组次内满足两个分谱叠加后的波高和周期的统计参数条件。

在波浪非线性逐渐增强的浅水区(图 7(b)),双峰谱与叠加波谱的演变已经出现了差异。从 $0.60\sim$

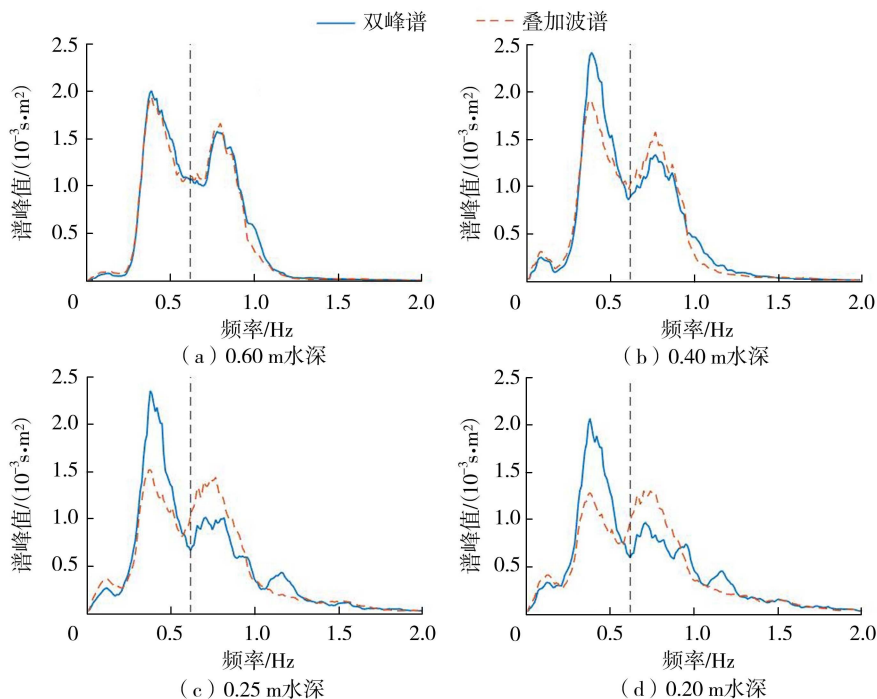


图 7 不同水深双峰谱与叠加波谱的演化对比

Fig. 7 Evolution comparison of bimodal spectrum and combined spectrum at different water depths

0.40 m 水深的区间内,波浪非线性逐渐增强且仍处于有效波高增大的区间,并没有明显的波浪破碎导致的波谱能量耗散的情况。这一水深条件下,双峰谱与叠加波谱的双峰能量分布的形状差异逐渐增大,主要是非线性作用导致的波能在不同频率之间的转移。随着波浪非线性的增大双峰谱的双峰之间的非线性作用使涌浪能量相对更大,对应图 6(b)中涌浪的谱峰能量占比更大,风浪的谱峰能量整体占比更小。

当波浪传播至浅水波浪破碎水深时(图 7(c)(d)),在更强的波浪非线性条件下双峰谱与叠加波谱的双峰演化差异更为明显。以双峰的中间频率做分割(图中黑色虚线),叠加波谱中的涌浪主峰和风浪主峰的能量相当,与入射波谱(图 7(a))中占比基本相同;而双峰谱在波谱总能量基本不变的情况下,涌浪主峰能量显著增大,风浪主峰能量显著减小,且在两个分谱的谱峰频率之和 $f_s+f_w=1.12\text{ Hz}$ 处出现了一个新的第三次峰。可见,双峰谱波浪与单峰谱波浪的主要差异是双峰谱波浪在斜坡上的浅水传播中,相对于单峰谱波浪的涌浪部分的能量耗散更小,而风浪能量的耗散更大;非线性作用本身并不导致波谱总能量的变化,双峰谱波浪中涌浪和风浪同时存在的这一特点,使得风浪主峰能量在非线性作用下转移到了涌浪主峰和第三次峰之中。

2.4 二阶谱分析

利用二阶谱方法可以分析非线性作用下波谱中不同频率之间的能量转移方向,二阶谱 $B(f_1,f_2)$ 可以由下式计算:

$$B(f_1,f_2)=E[F(f_1)F(f_2)F^*(f_1+f_2)] \tag{3}$$

式中: E 为期望值; $F(f)$ 为复数范围的傅里叶变换; $*$ 表示共轭复数。二阶谱 $B(f_1,f_2)$ 反映了 3 个频率分别为 f_1,f_2 和 $f_{1+2}=f_1+f_2$ 所构成的一组波之间的相关程度。二阶谱的虚部谱表示的是不同频率之间的能量转移方向,如图 8 所示,正值(红色)表示的是能量由低频(f_1 和 f_2)向高频(f_{1+2})转移,负值(蓝色)表示的是能量由高频向低频转移,相关程度越大对应的非线性作用能量转移强度越大。一组特定的频率(f_1 和 f_2)在二阶谱的虚部图上对应一个无量纲的期望值,由于二阶谱图像的对称特点(黑色实线为对称轴),图 8 中所示的是 $f_1>f_2$ 的期望值部分。以斜坡海滩工况为例,单峰谱风浪(图 8(a))和单峰谱涌浪(图 8(b))在 0.40 m 水深处的二阶谱表明,发生明显能量转移的频率区域主要是两块:在风浪和涌浪主峰内部的谱峰频率 $B(f_w,f_w)$ (风浪谱峰频率 $f_w=0.76\text{ Hz}$)和 $B(f_s,f_s)$ (涌浪谱峰频率 $f_s=0.42\text{ Hz}$)附近出现了最大的正值,能量转移至 2 倍谱峰频率的高频处,表现为在波谱上产生一个 2 倍主峰频率的次峰;最大的负值主要集中在 f_2 很小的次重力波频率 f_{ig} 的位置,能量由高频的谱峰频率处向低频转移,表现为波谱上产生的低频次重力波的波峰,以

及主峰内部较高频率部分的能量减小(图 5(a))。

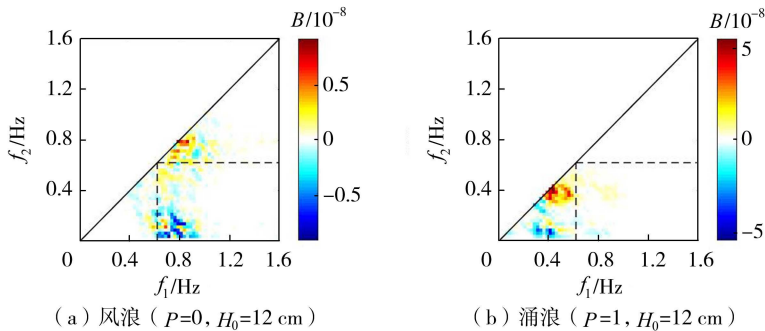


图 8 单峰谱波浪在 0.4 m 水深处的二阶谱

Fig. 8 Bispectrum of unimodal spectral waves at 0.4 m water depth

双峰谱波浪在同样条件下的二阶谱的虚部谱如图 9 所示,相比于单峰谱波浪的情况(图 8),风浪和涌浪主峰内部的非线性作用在整体上的占比减小,体现为谱峰频率 $B(f_w, f_w)$ 和 $B(f_s, f_s)$ 附近的正值相对减小。而双峰谱波浪在两个不同频率的涌浪和涌浪主峰之间构成了 f_s, f_w, f_{w+s} 和 f_s, f_w, f_{w-s} 两组波,这两组波之间的非线性作用影响显著。在 $B(f_w, f_s)$ 附近以正值为主,能量转移至高频,表现为在 f_{w+s} 频率处出现了一个新的第三次峰;在 $B(f_s, f_{w-s})$ 附近以负值为主,能量转移至低频。实际上由于 f_s 和 f_{w-s} 在频率上非常接近,二阶谱中 $B(f_s, f_s)$ 和 $B(f_s, f_{w-s})$ 对应的非线性作用所在的区域位置有重叠,且都主要集中在涌浪主峰的范围;因此在涌浪主峰的频率范围内,既有能量转移至更高的频率使得涌浪能量减小,也有能量由更高的频率转移进入使得涌浪能量增大。随着涌浪能量占比的变化,非线性作用的强度在涌浪主峰的频率范围内也有所变化,在风浪主导的双峰谱中(图 9(a))以 $B(f_s, f_{w-s})$ 附近的负值为主;而涌浪主导的双峰谱中(图 9(c)),以 $B(f_s, f_s)$ 附近的正值为主。

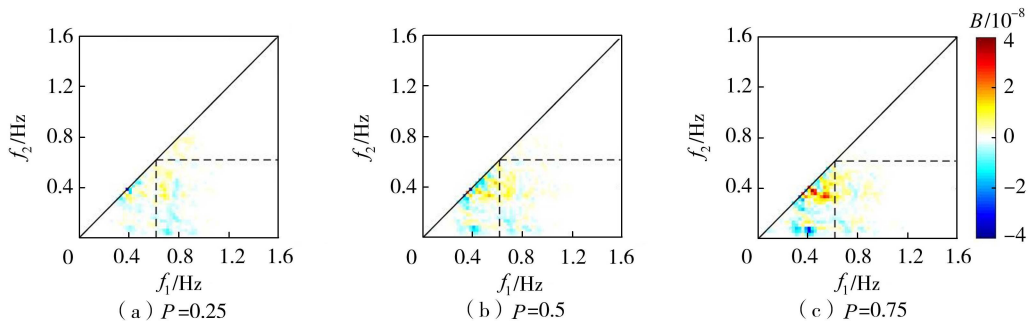


图 9 双峰谱波浪在 0.4 m 水深处的二阶谱 ($H_0=12\text{ cm}$)

Fig. 9 Bispectrum of bimodal spectral waves at 0.4 m water depth ($H_0=12\text{ cm}$)

总体上,利用二阶谱分析风浪和涌浪主峰之间的非线性作用, $B(f_w, f_s)$ 附近的正值表明能量由风浪和涌浪主峰转移至一个高频的第三次峰; $B(f_s, f_{w-s})$ 附近的负值表明能量由风浪主峰转移至涌浪主峰,对应双峰谱演化中涌浪主峰能量相对增大,而风浪主峰能量相对减小。

3 结 论

- a. 有效波高的变化受到浅水变形作用的影响,低频的涌浪有效波高增大更为显著,使得涌浪能量占比成为影响双峰谱波浪有效波高变化的主要因素。在西非典型的双峰谱波浪中,涌浪谱峰周期约为风浪谱峰周期的 2 倍;试验中涌浪单峰谱的最大有效波高约为风浪单峰谱的 1.3 倍。
- b. 双峰谱波浪的谱峰能量随波浪在海滩上传播的变化规律与单峰谱波浪不同。单峰谱波浪的谱峰能量在波谱总能量中的占比随水深减小而逐渐降低,双峰谱波浪则表现为涌浪的谱峰能量增长,而风浪的谱峰能量降低。因此双峰谱波浪的涌浪能量衰减更慢,在浅水中涌浪能量占比更大。
- c. 不规则波的波谱演化受到浅水变形、波浪破碎的影响,对于原始的双峰谱和对应单峰分谱的叠加波谱,两者波谱总能量的变化基本相同,有效波高和破碎水深接近。相对于单峰谱波浪,浅水中波浪非线性作

用的增大使得双峰谱的演化出现明显差异,涌浪主峰能量增大而风浪主峰能量减小,出现第三次峰。

d. 二阶谱分析表明,波谱主峰的能量向2倍频率的高频以及次重力波低频转移。此外,双峰谱波浪的风浪、涌浪主峰之间的非线性作用使得能量由风浪主峰转移至涌浪主峰,受双峰谱波浪中涌浪能量占比的影响,风浪能量占比越大则能量转移相对越大。

参考文献:

- [1] 黄培基,胡泽建. 胶州湾双峰海浪频谱的表示[J]. 海洋学报(中文版),1988,10(5):531-537. (HUANG Peiji, HU Zejian. Representation of bimodal wave spectra in Jiaozhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica,1988,10(5):531-537. (in Chinese))
- [2] 冯卫兵,任华堂,洪广文. 上海海域风浪谱分析与研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2002,30(3):28-32. (FENG Weibing, REN Huatang, HONG Guangwen. Representation of sea wave spectra for Shanghai seas[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2002,30(3):28-32. (in Chinese))
- [3] 黄美玲,陈汉宝,耿宝磊,等. 印尼爪哇岛南岸波浪双峰谱特征分析[J]. 水道港口,2018,39(6):671-5. (HUANG Meiling, CHEN Hanbao, GENG Baolei, et al. Statistical characteristics of sea waves with double-peaked spectrum at indonesia's south bank of the island of Java[J]. Journal of Waterway and Harbor,2018,39(6):671-675. (in Chinese))
- [4] ALMAR R, KESTENARE E, REYNS J, et al. Response of the Bight of Benin (Gulf of Guinea, West Africa) coastline to anthropogenic and natural forcing (Part1): wave climate variability and impacts on the longshore sediment transport[J]. Continental Shelf Research,2015,110:48-59.
- [5] SOARES C G. On the occurrence of double peaked wave spectra[J]. Ocean Engineering,1991,18(1/2):167-171.
- [6] DE LEÓN S P, SOARES C G. Distribution of winter wave spectral peaks in the seas around Norway[J]. Ocean Engineering,2012,50:63-71.
- [7] THOMPSON D A, KARUNARATHNA H, REEVE D E. An analysis of swell and bimodality around the south and south-west coastline of England[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences,2018(1):1-28.
- [8] 陈雪英,黄培基,胡泽建. 胶州湾双峰谱型波浪的统计特征[J]. 黄渤海海洋,1994,12(2):1-9. (CHEN Xueying, HUANG Peiji, HU Zejian. The statistical characteristics of sea waves with double-peaked spectra in Jiaozhou Bay[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas,1994,12(2):1-9. (in Chinese))
- [9] 张弛,劳伯村,郑金海. 加速度不对称波浪作用下的底部边界层动力特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(3):258-264. (ZHANG Chi, LAO Bocun, ZHENG Jinhai. Hydrodynamic characteristics of bottom boundary layer under acceleration-skewed waves[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2016,44(3):258-264. (in Chinese))
- [10] 陈松贵,陈汉宝,赵洪波,等. 珊瑚礁地形上胸墙波浪力大水槽试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(1):65-70. (CHEN Songgui, CHEN Hanbao, ZHAO Hongbo, et al. Experimental study of wave forces on the seawall of coral reef in large wave flume[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2019,47(1):65-70. (in Chinese))
- [11] 邓蔷. 双峰谱波浪作用下大窑湾水域响应数值模拟研究[J]. 中国水运,2015(6):58-59. (DENG Qiang. Numerical simulation on the water response of Dayao Bay under the influence of bimodal spectral waves[J]. China Water Transport,2015(6):58-59. (in Chinese))
- [12] ORIMOLOYE S, KARUNARATHNA H, REEVE D E. Effects of swell on wave height distribution of energy-conserved bimodal seas[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2019,7(3):7030079.
- [13] ORIMOLOYE S, KARUNARATHNA H, REEVE D E. Reflection analysis of impermeable slopes under bimodal sea conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2020,8(2):8020133.
- [14] ORIMOLOYE S, HORRILLO-CARABALLO J, KARUNARATHNA H, et al. Wave overtopping of smooth impermeable seawalls under unidirectional bimodal sea conditions[J]. Coastal Engineering,2021,165:103792.
- [15] 陈汉宝,管宁,戈龙仔. 双峰谱波浪模拟及斜坡堤越浪特征[J]. 港工技术,2019,56(2):8-11. (CHEN Hanbao, GUAN Ning, GE Longzai. Simulation of double-peak wave spectrum and overtopping characteristics of sloping breakwater[J]. Port Engineering Technology,2019,56(2):8-11. (in Chinese))
- [16] 潘毅,屈小开,周子骏,等. 海堤波浪溢流量的分布特征及估算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):260-267. (PAN Yi, QU Xiaokai, ZHOU Zijun, et al. Distribution characteristics and estimation method of discharge of combined wave and surge overtopping in sea levees[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):260-267. (in Chinese))
- [17] 史宪莹. 双峰谱和长周期波浪对系泊船舶作用研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [18] PIERSON JR W J, MOSKOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii[J]. Journal of Geophysical Research,1964,69(24):5181-5190.

[19] HASSELMANN K, BARNETT T P, BOUWS E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) [J]. Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Ergänzungsheft, 1973(Z8): 335. (DOI: 10. 1093/ ije/27. 2. 335).

[20] GODA Y. A comparative review on the functional forms of directional wave spectrum [J]. Coastal Engineering Journal, 1999, 41 (1): 1-20.

[21] STREKALOV S S, TSYPLOUKHIN V P, MASSEL S T. Structure of sea wave frequency spectrum [J]. Coastal Engineering Proceedings, 1972, 13(1): 307-314.

[22] OCHI M K, HUBBLE E N. Six-parameter wave spectra [J]. Coastal Engineering, 1976(1): 301-328.

[23] SOARES C G. Representation of double-peaked sea wave spectra [J]. Ocean Engineering, 1984, 11(2): 185-207.

[24] TORSETHAUGEN K. Two peak wave spectrum model [J]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: OMAE, 1993(2): 175-180.

[25] TORSETHAUGEN K, HAVER S. Simplified double peak spectral model for ocean waves [C]//CHUNG J S, PREVOSTO M, CHOI H S. The Proceedings of The Fourteenth (2004) International Offshore and Polar Engineering Conference: Volume III. Toulon, France: ISOPE, 2004: 76.

[26] AKBARI H, PANAHI R, AMANI L. A double-peaked spectrum for the northern parts of the Gulf of Oman: revisiting extensive field measurement data by new calibration methods [J]. Ocean Engineering, 2019, 180: 187-98.

[27] 陈文炜, 刘小龙, 杭岑, 等. Ochi-Hubble 双峰谱在近岛礁海域的适用性研究 [J]. 中国造船, 2020, 61(1): 120-30. (CHEN Wenwei, LIU Xiaolong, HANG Cen, et al. Study on applicability of bi-modal wave spectrum in waters near islands and reefs [J]. Shipbuilding of China, 2020, 61(1): 120-130. (in Chinese))

[28] HERBERS T H C, RUSSNOGLE N R, ELGAR S. Spectral energy balance of breaking waves within the surf zone [J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 30(11): 2723-2737.

[29] 赵建. 近岛礁环境条件下波浪双峰频谱演化规律研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.

[30] LIU Xiaolong, CHEN Wenwei, SUN Ze, et al. Investigation on the reconstruction of wave bimodal spectrum in the lagoon near islands and reefs [J]. Ocean Engineering, 2022, 265: 112615.

[31] RICONDO A, CAGIGAL L, PÉREZ-DÍAZ B, et al. Introducing bimodal sea-states in a hybrid model for nearshore wave processes [J]. Coastal Engineering, 2024, 192: 104556.

[32] RICONDO A, CAGIGAL L, PÉREZ-DÍAZ B, et al. HySwash: a hybrid model for nearshore wave processes [J]. Ocean Engineering, 2024, 291: 116419.

[33] VILLEFER A, BENOIT M, VIOLEAU D, et al. Spectral wave modeling of bimodal sea states at laboratory and coastal scales [J]. Ocean Modelling, 2023, 183: 102182.

[34] MELET A, ALMAR R, MEYSSIGNAC B. What dominates sea level at the coast: a case study for the Gulf of Guinea [J]. Ocean Dynamics, 2016, 66(5): 623-36.

[35] ALMAR R, HOUNKONNOU N, ANTHONY E J, et al. The Grand Popo beach 2013 experiment, Benin, West Africa: from short timescale processes to their integrated impact over long-term coastal evolution [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 70: 651-656.

[36] 王广生, 童林龙, 罗梦岩, 等. 贝宁海滩上波浪传播演变特性研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 123-129. (WANG Guangsheng, TONG Linlong, LUO Mengyan, et al. Study on wave propagation and evolution characteristics over a beach in Benin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(6): 123-129. (in Chinese))

[37] 张继生, 钱方舒, 童林龙, 等. 细砾质斜坡海床上波浪的传播特性试验 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 150-157. (ZHANG Jisheng, QIAN Fangshu, TONG Linlong, et al. Experimental study on wave propagation over fine gravel slope seabed [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(2): 150-157. (in Chinese))