

潮汐影响下海滩前滨波浪传播耗能过程分析

宋嘉诚¹, 戚洪帅², 张弛¹, 蔡锋², 尹航²

1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024;

2. 自然资源部第三海洋研究所, 福建 厦门 361005

摘要: 文章基于长乐海滩前滨剖面的实测波浪数据, 通过统计分析以及谱分析的方法, 探讨了潮汐过程中长乐海滩波浪参数及耗能过程的变化规律。结果表明, 观测期间内波浪以混合浪为主, 各测点谱型较宽, 存在多峰振荡现象。向岸传播过程中, 波能耗散的形式为窄频域向宽频域转变, 能量分布趋于分散, 高频波能减小, 低频波能反而有所上升, 波浪破碎后生成重力波。破波带内的能量衰减与波浪传播距离具有良好的相关性, 破碎波能在破波带内大约衰减了98.3%。潮汐水位对波浪具有明显的调制作用。入射波能随潮汐水位的增加而有所增加, 且水位越高, 入射波能分布越分散。破波带内的有效波高和潮汐水位具有显著的正相关关系。潮汐过程中固定测点的波谱变化与波浪沿剖面的波谱变化具有明显的相似性。

关键词: 潮汐; 波参数; 波浪谱; 潮间带

中图分类号: P731.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2022)04-0146-08

Analysis of energy dissipation process of wave propagation in beach foreshore under the influence of tide

SONG Jiacheng¹, QI Hongshuai², ZHANG Chi¹, CAI Feng², YIN Hang²

1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China

Abstract: Based on the measured wave data of the foreshore profile at the Changle beach, the variation rules of wave parameters and energy dissipation process in the tidal process are discussed using statistical analysis and spectral analysis. The results show that the wave in the observation period is mainly mixed wave, and the spectrum type of each sensor is wide, and the multi-peak oscillation is observed. In the process of shoreward propagation, the form of wave energy dissipation is changed from narrow frequency domain to broad frequency domain, the energy distribution tends to be dispersed, the energy of high frequency wave decreases, but the energy of low frequency wave increases, and infra-gravity wave is generated after wave breaking. There is a good correlation between the energy attenuation and the wave propagation distance in the surf zone. The energy attenuation of the broken wave in the surf zone is about 98.3%. The tidal level has obvious modulating effect on waves. The incident wave energy increases with the increase of tidal water level, and the higher the water level is, the more dispersed the distribution of incident wave energy is. There is a significant positive correlation between the effective wave height and the tidal level in the surf zone. The spectral variation of each sensor in tidal process has obvious similarity with the wave spectral variation along the profile.

Key words: tides; wave parameters; wave spectrum; intertidal zone

收稿日期: 2021-06-26; 修订日期: 2021-08-18。姚衍桃编辑

基金项目: 国家自然科学基金项目(41930538、42076211)

作者简介: 宋嘉诚(1996—), 男, 江苏省南通市人, 硕士研究生, 从事海岸带波浪研究。email: songjc610@126.com

通信作者: 戚洪帅。email: qihongshuai@tio.org.cn

Received date: 2021-06-26; Revised date: 2021-08-18. Editor: YAO Yantao

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (41930538, 42076211)

Corresponding author: QI Hongshuai. email: qihongshuai@tio.org.cn

砂质海滩是宝贵的自然资源,具有良好的海岸防护、旅游休闲和生态服务等功能。波浪是海滩发育演变的直接动力因素,波浪在浅水区的破碎和波能耗散过程是海滩地形塑造的主控因素。对其研究不仅有助于分析海滩波浪、潮汐等耦合的水动力过程特征,也可为海岸带的防灾减灾及修复工程提供科学基础。

近年来,随着波浪观测技术和观测手段的不断丰富,对海滩近岸波浪传播变形的认识也不断深化。Mahmoudof 等(2016)在里海南部海滩通过现场波浪观测,分析了波浪传播过程中的能量谱变化。Sénéchal 等(2001, 2002)在法国南部砂质海滩进行了波浪观测,分析了近岸不规则波传播过程及波能耗散。Inch 等(2017)利用现场观测数据分析了破波带内长重力波现象。长重力波是一种低频长波(0.005~0.05Hz),对于破波带内泥沙运动和波浪爬高具有重要影响(Bowen et al, 1984)。Levoy 等(2001)在法国强潮海滩开展水动力观测试验后,总结出该区域的水动力特征。Zhou 等(2020)总结分析了台风期间三门湾的波谱特征及波浪组成。李志强等(2005)、陈子燊等(2001, 2002)分析了广东沿海多处海滩的波浪在传播过程中统计特征的变化规律。尽

管前人对海滩近岸波浪传播开展了较多的研究,但潮汐对海滩波浪过程的影响仍需要进一步探讨。

本研究基于长乐海滩潮间带内的浪潮仪波浪数据,探讨长乐海滩潮间带内的波浪参数特征,分析沿剖面的耗能过程以及潮汐水位变化对于潮间带内各测点波要素的影响,并总结潮汐影响下海滩波浪传播耗能的基本规律。

1 研究区概况

本文研究区地处台湾海峡西岸,岸线总体走向为 NNE(图 1)。长乐区夏季多偏南风,冬季多东北风,台风平均每年 4~5 次,多年平均风速为 $4.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,多年平均 7 级以上大风天数为 35.4d。受季风环流和台湾海峡“管束效应”影响,长乐海滩的潮汐类型为不规则半日潮,最大涨潮流速 $69\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,最大落潮流速 $76\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,潮流流向变化复杂,多年平均潮差为 4.27m(蔡志爱 等, 2009)。沿岸波浪以混合浪为主,沿岸常浪向为 NE—NNE 向,多年平均波高为 1.0~1.5m,平均周期为 4.2~5.9s。长乐海滩滩面和水下岸坡地势平缓,潮间带坡度大约为 0.0125~0.02。潮间带平均宽度约为 300m,滩面沉积物主要为中砂和细砂,粒径范围为 0.07~0.18mm。

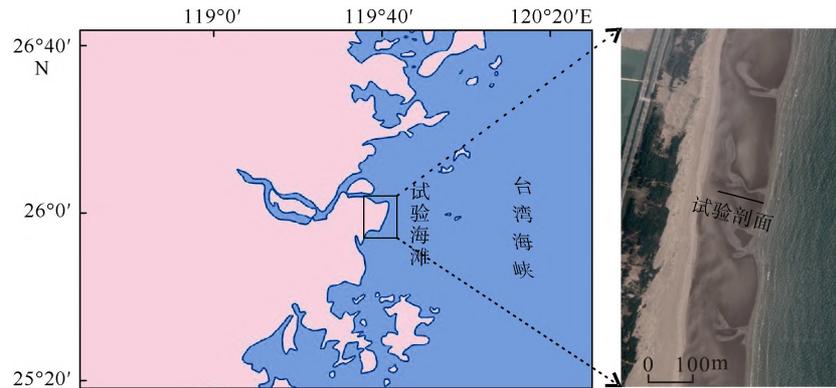


图 1 研究区及观测点位置

该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3266 的标准地图制作,底图无修改

Fig. 1 Location of study area and observation profile

2 研究方法

在长乐海滩选取典型剖面进行潮间带内的海滩波浪观测试验,试验剖面位置见图 1,剖面上的仪器布置见图 2。试验日期从 2020 年 11 月 29 日至 2020 年 12 月 4 日,共经历 8 个潮周期(由于潮汐原因,P1 的试验日期为 2020 年 11 月 29 日至 2020 年 12 月 2 日)。波浪观测设备为 RBRsolo³ D|wave16 浪潮仪,设

置数据采样间隔为 5min,采样频率为 4Hz,采样数为 1024 个,即每 5min 采集 1024 个样为 1 组,共采集了 1420 组数据。仪器的压力探头朝上,距离滩面 30cm。沿剖面从低潮位每 0.7m 高程布设 1 台,共 6 台。采用 RTK-GPS 进行海滩地形数据测量。

浪潮仪采集的数据采用 Ruskin 软件进行处理,获得水深和波浪(波形图、平均波高、有效波高、最大波高、十分之一大波平均波高及其对应波周期、

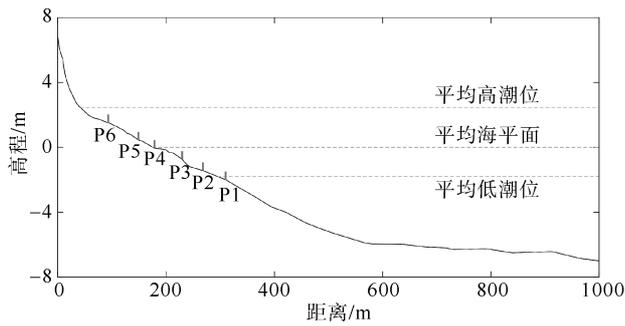


图2 试验剖面及仪器布置图

Fig. 2 Beach bathymetric profile and sensor deployment

波能等)数据。采用快速傅里叶方法(文圣常等, 1984)计算实测波能谱,并用汉明窗对原始谱进行光滑处理。为补偿水体引起的高频信号衰减,在计算有关波要素时将压力谱订正为波面谱(俞聿修, 2000),订正公式如下:

$$S(f) = \frac{\cosh^2(kd)}{\cosh^2(d-z)} S_p(f) \quad (1)$$

式中: $S(f)$ 为波面谱; k 为波数; d 为水深; z 为仪器在水中的深度; $S_p(f)$ 为压力谱。

采用的订正截止频率为:

$$f_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{\pi z}} \quad (2)$$

式中: f_{\max} 为订正截止频率; g 为重力加速度。

在此基础上进一步计算谱尖度因子 Q_p 、谱宽度 ε 、谱峰周期 T_p 、有效波陡 S_s 、破波系数 ζ 等在内的

部分谱参数和波浪参数,计算公式如下(Galvin, 1968; 俞聿修, 2000):

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df; n = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

$$S_s = \frac{2\pi H_s}{g T_s^2} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\tan \beta}{(H_b / L_0)^2} \quad (5)$$

$$L_0 = \frac{g T_s^2}{2\pi} \quad (6)$$

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f S^2(f) df \quad (7)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (8)$$

$$T_p = 1 / \max[S(f)] \quad (9)$$

以上公式中: m_n 是指第 n 阶矩; f 为频率; $S(f)$ 为 f 对应的谱密度; β 为海滩坡度; H_b 为破波波高; H_s 为有效波高; T_s 为有效波周期; L_0 为深水波长。

3 数据结果分析

3.1 波要素基本特征

试验期间,观测区域的大潮平均潮差约为 4.5m,入射有效波高范围约为 0.2~2.2m,有效波周期范围约为 4~12s。入射波浪处(P1)的水深、时间序列的有效波高和有效波周期见图 3。

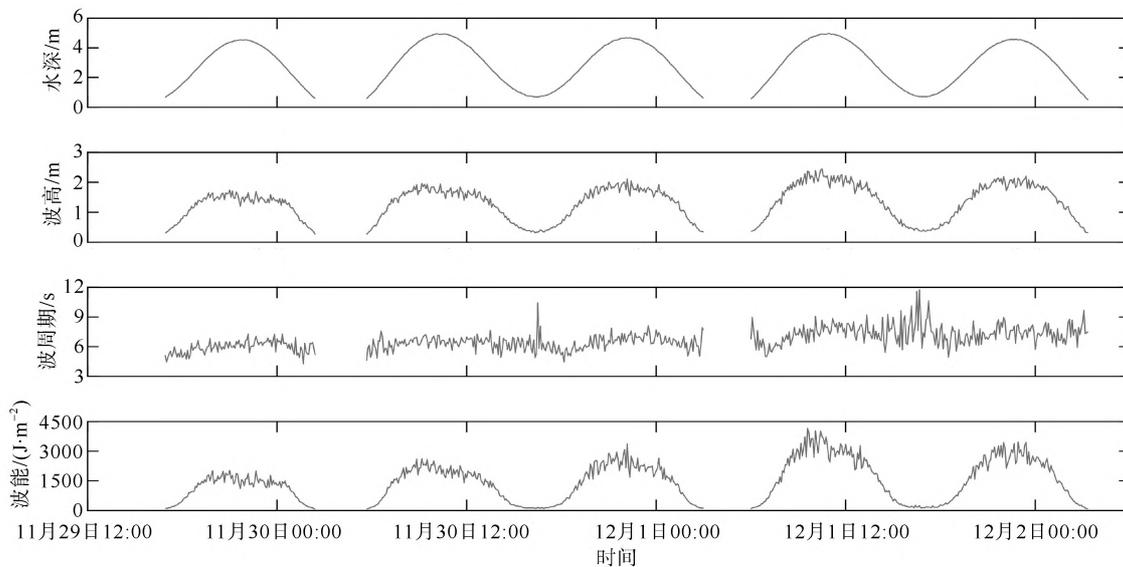


图3 P1处波要素时间序列图

Fig. 3 Time series of wave elements of P1

对各测点的实测波浪资料进行统计分析,得到了观测期内高潮位时各测点的波要素(波高、波周期、波

能)及有效波陡的平均值(表 1)。受天气影响,试验期间内观测区波浪以混合浪为主。根据表 1 所示,高潮位

时, 大部分波浪传播到 P3 和 P4 之间时开始破碎, 直至海岸线附近。有效波高均值在 0.70~1.87m 的范围内变化, 破碎后有效波高沿剖面衰减。波浪破碎前有效波陡较大, 在 0.23 左右, 波浪破碎后有效波陡沿剖面逐渐减小。破碎前有效波周期均值在 7s 以上, 破碎

后略有减小。波能衰减较快, 最大波能均值大约为最浅水处波能均值的 5 倍。取 P3 处的有效波高作为破波波高, 计算破波系数为 0.124, 根据 Galvin(1968)给出的分类标准并结合现场实际观测情况, 确定长乐海滩前滨破波类型以崩破波为主。

表 1 高潮位时各测点的波浪参数统计

Tab. 1 Wave parameter statistics at the high water level of each sensor

| 统计参数 | 测点 | | | | | |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 |
| 水深均值/m | 4.72 | 4.05 | 3.33 | 2.66 | 2.00 | 1.38 |
| 有效波高均值/m | 1.83 | 1.87 | 1.71 | 1.48 | 1.25 | 0.70 |
| 有效波周期均值/s | 6.94 | 7.26 | 7.32 | 6.86 | 7.08 | 6.33 |
| 有效波陡均值 | 0.025 | 0.023 | 0.021 | 0.021 | 0.016 | 0.011 |
| 波能均值/(J·m ⁻²) | 2529.79 | 2604.86 | 2262.28 | 1654.48 | 1143.96 | 437.73 |

3.2 波谱特性

3.2.1 高潮时刻波谱沿剖面方向的变化

取一个代表性高潮时刻(2020 年 12 月 1 日 10 时 55 分)的波形图数据进行谱分析并计算谱参数。从图 4 可以看出各测点的谱形较宽, 形状复杂, 峰频左侧的能量较低; 而右侧则存在明显的能量峰值, 在 0.1~0.3Hz 之间存在多峰振荡过程, 并从 0.3Hz 以后往高频方向逐渐递减。多峰现象表明可能存在着较强的波-波非线性相互作用, 有限水深和浅水区波-波非线性相互作用以 3 个子波相互作用为主, 能量主要从峰频向高频侧转移(陈子燊 等, 2003), 谱低频长重力与谱的峰频或高频侧谱峰间广泛存在着倍频、多倍频和差频关系。因此, 峰频能量有可能存在向高、低频端转移的过程, 且组成波间的非线性

相互作用由于潮汐水位调制和波动与岸滩地形的相互作用而进一步复杂化(李志强 等, 2010)。根据表 2 数据, P1 至 P5 的谱峰周期 T_p 在 9.14~10.67s 之间, 波浪向岸传播过程中, 最大谱密度由 4.92m²·s 减小到 0.46m²·s, 谱尖度参数由 1.75 减小到 0.72, 谱宽度参数由 0.66 增加到 0.80。此外, 随着水深减小, 高频波能不断减小, 低频波能反而有所上升。在 P6 处出现了峰频转移, 低频波的峰值能量超过高频波, 谱峰周期变为 36s。

表 2 高潮位时各测点的谱参数统计

Tab. 2 Spectral parameter statistics of each sensor at high water level

| 测点 | 谱峰周期/s | 最大谱密度/(m ² ·s) | 谱尖度 | 谱宽度 |
|----|--------|---------------------------|------|------|
| P1 | 9.14 | 4.92 | 1.75 | 0.66 |
| P2 | 9.14 | 4.44 | 1.56 | 0.68 |
| P3 | 9.48 | 3.83 | 1.38 | 0.68 |
| P4 | 9.48 | 2.06 | 1.16 | 0.75 |
| P5 | 10.67 | 0.97 | 1.05 | 0.75 |
| P6 | 36.57 | 0.46 | 0.72 | 0.80 |

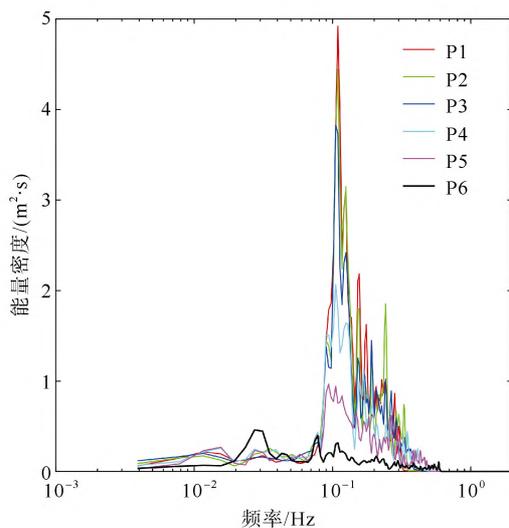


图 4 高潮位时沿剖面的频谱变化图

Fig. 4 Spectrum variation along the profile at high water level

3.2.2 固定测点波谱在潮汐过程中的变化

如图 3 所示, 整个观测期间, 波能受控于周期性的潮汐水位。在落潮过程中, P1 的能量谱谱形较宽, 形状复杂, 峰频左侧的能量较低, 右侧也存在多峰振荡现象, 波浪分布主要集中在 0.1~0.3Hz 的频率之间(图 5)。根据潮汐过程中各时刻的谱参数统计(表 3), 从最高潮到最低潮, P1 处的最大谱密度由 3.6m²·s 减小到 0.16m²·s, 谱尖度参数由 1.87 减小到 0.47, 谱宽度参数由 0.68 增加到 0.89。在高水位时, 谱峰周期在 8.5s 左右; 随着潮位降低, 主频波由高

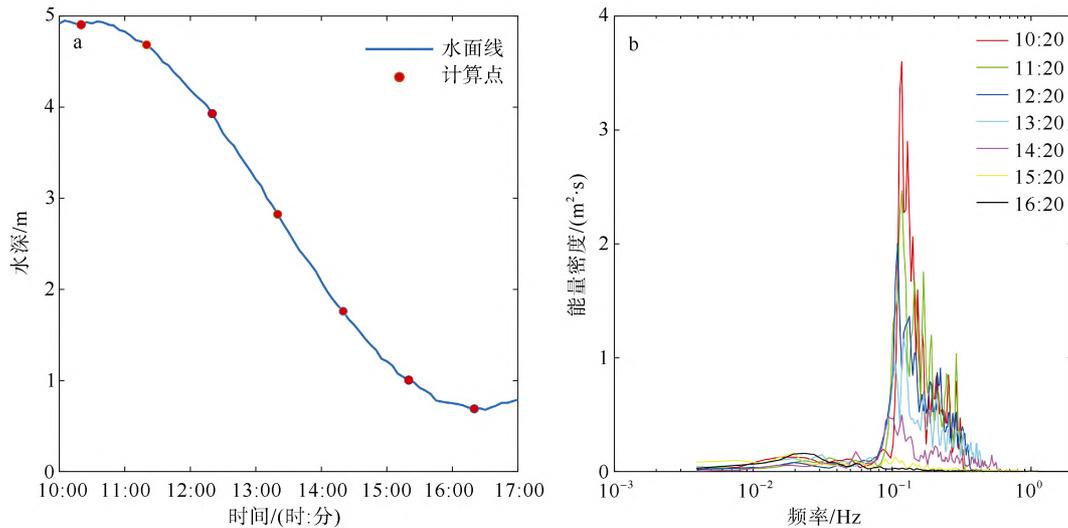


图5 潮汐过程图(a)与各时刻 P1 处的波能谱变化图(b)

Fig. 5 Tidal process (a) and change of wave energy spectrum of P1 in the tidal process (b)

频转向低频, 谱峰周期在 50s 左右。尽管整个过程中的主频能量一直在减小, 但在低潮位时的低频能量相较于高潮位时略有增加。

表3 潮汐过程中各时刻的谱参数统计

Tab. 3 Spectral parameter statistics of P1 in the tidal process

| 时刻 | 谱峰周期/s | 最大谱密度/($m^2 \cdot s$) | 谱尖度 | 谱宽度 |
|-------|--------|-------------------------|------|------|
| 10:20 | 8.53 | 3.60 | 1.87 | 0.68 |
| 11:20 | 8.53 | 2.46 | 1.62 | 0.62 |
| 12:20 | 9.14 | 2.00 | 1.58 | 0.66 |
| 13:20 | 8.26 | 1.16 | 1.24 | 0.69 |
| 14:20 | 8.53 | 0.50 | 0.99 | 0.75 |
| 15:20 | 51.20 | 0.16 | 0.60 | 0.85 |
| 16:20 | 42.67 | 0.16 | 0.47 | 0.89 |

3.3 潮汐过程中的波能与波高变化特征

图6显示了观测期间内多个潮周期过程中不同水位时刻的波能沿剖面的变化。当水位处于平均海平面时, 有3个测点观测到波浪数据, 波浪在观测区域外破碎, P1处的入射波能较为集中, 均值在 $800J \cdot m^{-2}$ 左右, 能量沿剖面耗散均匀。当水位上升1m时, 共有5个测点观测到波浪数据, P1处的入射波能分布较为分散, 均值在 $1500J \cdot m^{-2}$ 左右, 在向岸传播过程中, 波浪从 P1 和 P2 间开始破碎, 波能分布逐渐集中且沿剖面耗散均匀。当水位上升到海平面上2m时, P1处的入射波能相较于1m水位时更为分散, 波能均值约为 $2300J \cdot m^{-2}$, 波浪在 P3 点附近开始破碎, 而后波能分布较为集中。整个观测过程中, 破波带内波能沿剖面的耗散比较均匀。

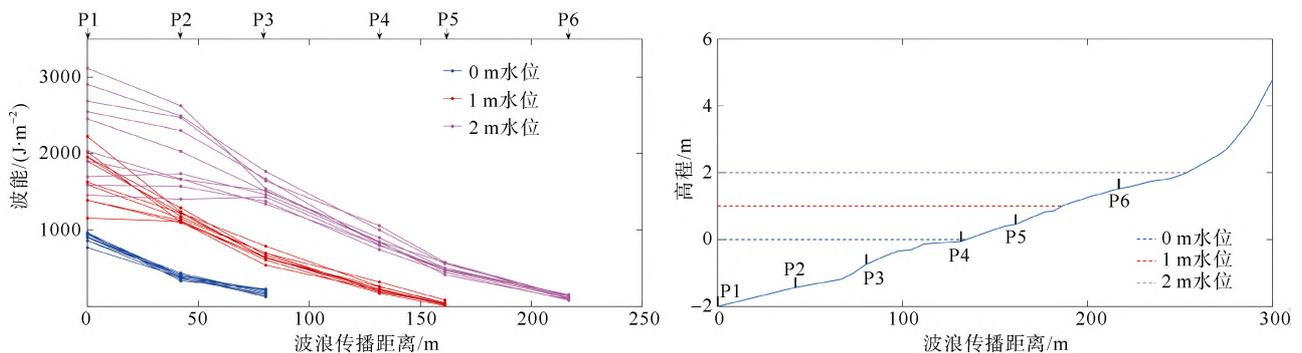


图6 不同潮汐水位下波能沿剖面的衰减

Fig. 6 Wave energy attenuation along the propagation profile at different water levels

相对波高(波高与水深之比)是衡量波浪作用于底床的重要参数。波高或水深一定时, 相对波高越大, 波浪与底床的摩擦就越大。观测区域内的有效

波高和水深具有显著的正相关关系(图7)。在水深小于3m时, 有效波高和水深的相关性较好; 而当水深超过3m后, 两者的相关性变差。此外, 在本次试验

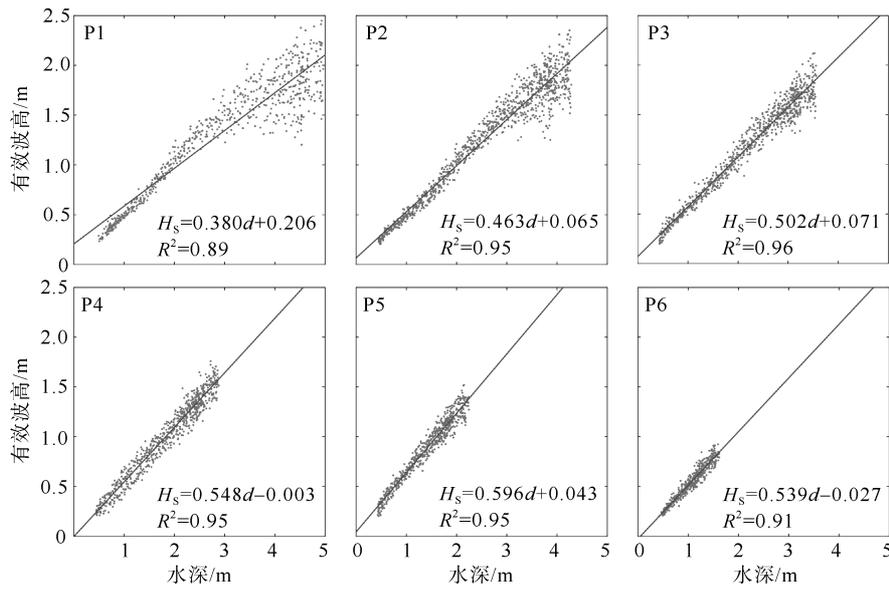


图 7 各测点有效波高与水深关系图

Fig. 7 Relationship between effective wave height and depth at each sensor

中，浅水处(水深小于 3m)相对有效波高的值稳定在 0.5~0.6 之间。

4 讨论

4.1 海滩上波浪的传播耗能过程

底摩阻耗能和波浪破碎耗能是导致近岸浅水区波能耗散的主要原因(任剑波 等, 2020)。本次观测条件下，长乐海滩破波带较宽，以崩破波为主。波浪前进到 3m 水深左右开始破碎，2.5m 水深时基本全部破碎。低潮时破波带位于观测区域外，随着涨潮过程向岸移动；高潮时破波带范围覆盖了 P4 至 P6 并延伸到海岸线，波浪在向岸传播过程中可能发生多次破碎(闫圣 等, 2020)。如图 6 所示，海滩上波浪的传播特征为破波带外的入射波能分布较为分散，破波带内的波能分布趋于集中。为了进一步分析破波带内的波能分布，取整个观测周期内不同潮汐时刻的破波带内数据(破波点分别位于 P1、P2 和 P3)共 330 组，进行无量纲分析。结果显示，波能衰减与波浪沿剖面传播的距离具有良好的相关性(图 8)，并以此关系估算破碎波能在破波带内大约衰减了 98.3%，剩余能量在冲流带内完全耗散。相关式如下：

$$(E/E_0)^{0.5} = -0.8695(X/X_0) + 1 \quad (10)$$

式中： E_0 为破波点处起始波能； X 为波浪在破波带内传播的距离； X_0 为破波带宽度，可通过潮位及地形数据推算得到。

本研究中波能谱沿剖面变化的情况与李志强(2005)在粤东后江湾近岸观测到的波浪传播变形的

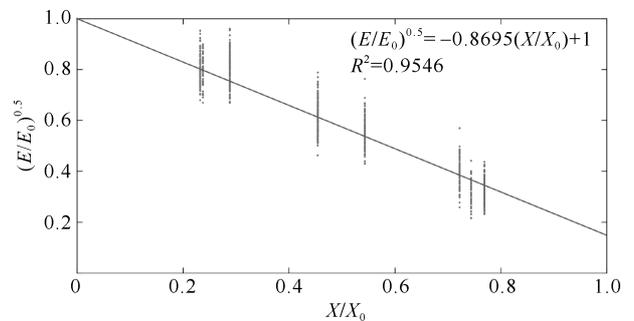


图 8 波能分布关系

Fig. 8 The relation map of wave energy distribution

性质相似，表明波浪在向岸传播的过程中，波能耗散的形式为窄频域向宽频域转变，能量分布趋于分散。波浪在传播到浅水处出现的峰频转移及低频波能增加的现象，可按 Longuet-Higgins 等(1962)的理论来解释，观测区域内的风浪和涌浪通过非线性相互作用会生成受约束的长重力波，其周期和波长与短波波群相同，相位也与短波波群相耦合，故在波浪破碎前没有明显的长重力波现象；而波浪破碎后，受约束的长重力波将被释放成自由长重力波。因此，在 P6 处观测到的是波浪破碎后释放出的自由长重力波，低频波能占比也随之显著增加。

4.2 潮汐过程对海滩波浪的影响

潮汐引起的水位变化会导致海滩上破波带的往复迁移，从而影响海滩近岸的波浪过程。根据图 6 所示，随着潮汐水位的增加，观测区域内的入射波能均值也随之增加，波能区间更加分散。这主要是

由于低水位时入射到观测区域内的波浪位于破波带内且受底摩擦影响, 而高水位时的入射波浪尚未破碎。

本次观测中, 长乐海滩的潮汐水位与有效波高在水深小于 3m 的情况下(即破波带内)具有显著的正相关性, 与 Sénéchal 等(2002)在法国海滩观测到的情况一致。这是由于在浅水处, 波浪受到底摩擦的影响而破碎导致的。水深较大时, 波浪未触底破碎, 入射波高分布较广; 而进入破波带后, 波浪发生破碎耗能, 向岸传播时受底摩擦作用而发生多次破波, 波高会衰减到与水深相适应的程度。本次试验中破波带内的相对有效波高的均值稳定在 0.5~0.6 之间。

波能谱随潮汐水位的变化规律与高潮位时波

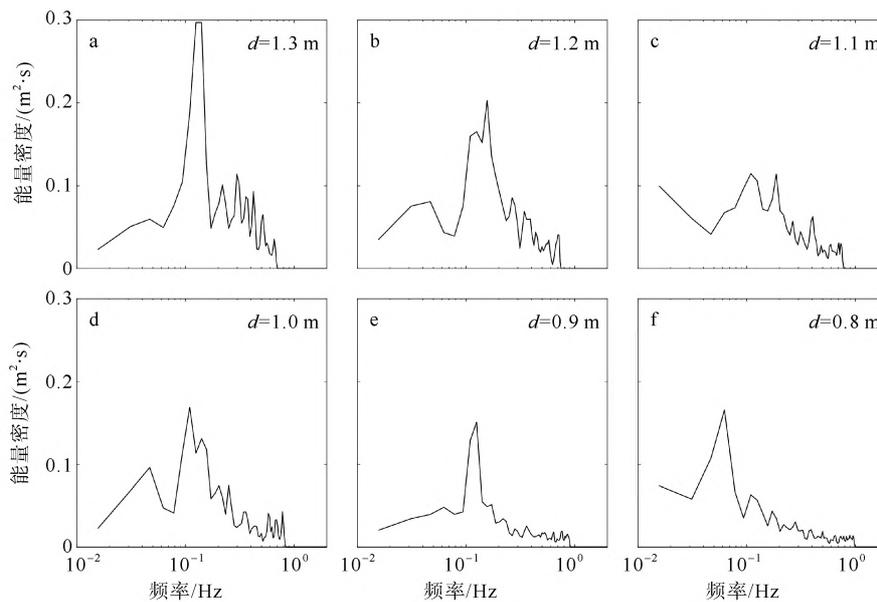


图 9 落潮过程中 P1 处的波能谱逐时变化图

Fig. 9 Variation of wave energy spectrum of P1 per hour during ebb tide

5 结论

本文通过对福州市长乐东部海滩前滨潮间带内波浪要素的观测, 利用统计方法计算了观测区域内的波浪参数以及波谱参数。从波要素沿剖面变化、波浪谱沿剖面变化和潮汐水位影响下的波要素变化等方面, 探讨了长乐东部海滩潮间带内波浪的沿剖面耗能过程, 获得如下主要结论:

1) 观测期间内长乐海滩波浪以混合浪为主。谱型较宽, 存在多峰振荡现象, 能量集中在 0.1~0.3Hz 之间。向岸传播过程中, 最大谱密度减小, 谱尖度参数减小, 谱宽度参数增加。波能耗散的形式为由窄

能谱沿剖面的变化规律有类似的特征, 这主要是由地形因素所导致的。长乐海滩的坡度以及沉积物颗粒的粒径变化不大, 涨落潮过程中水位变化和波浪沿剖面传播过程中水位变化对波浪的作用基本相同。沿剖面波能谱的变化规律与逐时的波能谱变化规律类似。图 9 为落潮过程中 P1 处的波能谱逐时变化图, 从图 9a—e 可以看出, 谱峰频率在 0.1~0.2Hz 之间, 且在水深减小的过程中, 低频波能经历了由增加到衰减的过程。而根据图 9f 显示, 随着水深的继续减小, 谱峰频率出现由高频向低频突变的现象, 低频波能显著增加, 且除 P1 外的其余 5 个测点都观测到了主频突变的过程。因此, 本文推测波浪在向岸传播的过程中, 波能谱在浅水处发生的变化也是如此。

频域向宽频域转变, 能量分布趋于分散。

2) 波浪传播至破波带内时, 其有效波高和水深具有显著的正相关关系; 而在破波带外, 这种正相关关系有所减弱。波浪传播到滩前时, 高频波能减小, 低频波能反而有所上升, 有明显的长重力波现象。

3) 涨落潮过程中, 入射波能随潮汐水位的增加而有所增加, 且水位越高, 入射波能的分布区间越分散。由于地势平坦, 坡度以及沉积物颗粒的粒径变化不大, 涨落潮过程中波能谱的变化与高潮时刻波能谱沿剖面的变化具有类似特征。

参考文献 References

- 蔡志爱, 石谦, 2009. 台湾海峡成因初探[M]. 厦门: 厦门大学出版社: 26–32 (in Chinese).
- 陈子燊, 欧素英, 戴志军, 等, 2001. 岬间海湾滨面带波浪结构和外观统计特征[J]. 海洋通报, 20(3): 1–7. CHEN ZISHEN, OU SUYING, DAI ZHIJUN, et al, 2001. Analysis of the statistic characteristics of wave structure and appearance in the shoreface zones of the bays between headlands[J]. Marine Science Bulletin, 20(3): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- 陈子燊, 李志强, 李志龙, 等, 2002. 海滩碎波带波性质的统计对比分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 41(6): 86–90. CHEN ZISHEN, LI ZHIQIANG, LI ZHILONG, et al, 2002. Statistical analysis and comparison on wave properties in a beach-surf zone[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 41(6): 86–90 (in Chinese with English abstract).
- 陈子燊, 李志强, 戴志军, 等, 2003. 近岸带三组成波耦合作用的观测与分析[J]. 热带海洋学报, 22(6): 46–53. CHEN ZISHEN, LI ZHIQIANG, DAI ZHIJUN, et al, 2003. Observations and analysis for triad wave coupling in nearshore waters[J]. Journal of Tropical Oceanography, 22(6): 46–53 (in Chinese with English abstract).
- 李志强, 陈子燊, 李志龙, 等, 2005. 粤东后江湾近岸波浪要素变化特征分析[C]//中国海洋工程学会. 第十二届中国海岸工程学术研讨会论文集. 昆明: 中国海洋工程学会: 468–472 (in Chinese).
- 李志强, 陈子燊, 李志龙, 2010. 近岸带波浪传播过程中波性质的统计对比分析[J]. 广东海洋大学学报, 30(4): 43–47. LI ZHIQIANG, CHEN ZISHEN, LI ZHILONG, 2010. Statistical analysis and comparison on wave characteristics during wave propagating in nearshore zone[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 30(4): 43–47 (in Chinese with English abstract).
- 任剑波, 何青, 沈健, 等, 2020. 远区台风“三巴”对长江口波浪动力场的作用机制[J]. 海洋科学, 44(5): 12–23. REN JIANBO, HE QING, SHEN JIAN, et al, 2020. The effect mechanism of a remote typhoon “Sanba” on wave dynamics in the Changjiang Estuary[J]. Marine Sciences, 44(5): 12–23 (in Chinese with English abstract).
- 文圣常, 余宙文, 1984. 海浪理论与计算原理[M]. 北京: 科学出版社(in Chinese).
- 闫圣, 邹志利, 2020. 海岸波浪多次破碎波能耗散模型[J]. 海洋学报, 42(9): 30–37. YAN SHENG, ZOU ZHILI, 2020. A new model of wave energy dissipation for multiple wave breaking on very mild beach[J]. Haiyang Xuebao, 42(9): 30–37 (in Chinese with English abstract).
- 俞聿修, 2000. 随机波浪及其工程应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社. YU YUXIU, 2000. Random wave and its applications for engineering[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press (in Chinese).
- BOWEN A J, HUNTLEY D A, 1984. Waves, long waves and nearshore morphology[J]. Marine Geology, 60(1–4): 1–13.
- GALVIN C J, 1968. Breaker type classification on three laboratory beaches[J]. Journal of Geophysical Research, 73(12): 3651–3659.
- INCH K, DAVIDSON M, MASSELINK G, et al, 2017. Observations of nearshore infragravity wave dynamics under high energy swell and wind-wave conditions[J]. Continental Shelf Research, 138: 19–31.
- LEVOY F, MONFORT O, LARSONNEUR C, 2001. Hydrodynamic variability on megatidal beaches, Normandy, France[J]. Continental Shelf Research, 21(6–7): 563–586.
- LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W, 1962. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats’[J]. Journal of Fluid Mechanics, 13(4): 481–504.
- MAHMOUDOF S M, BADIEI P, SIADATMOUSAVI S M, et al, 2016. Observing and estimating of intensive triad interaction occurrence in very shallow water[J]. Continental Shelf Research, 122: 68–76.
- SÉNÉCHAL N, BONNETON P, DUPUIS H, 2002. Field experiment on secondary wave generation on a barred beach and the consequent evolution of energy dissipation on the beach face[J]. Coastal Engineering, 46(3): 233–247.
- SÉNÉCHAL N, DUPUIS H, BONNETON P, et al, 2001. Observation of irregular wave transformation in the surf zone over a gently sloping sandy beach on the French Atlantic coastline[J]. Oceanologica Acta, 24(6): 545–556.
- ZHOU YANG, YE QIN, SHI WEIYONG, et al, 2020. Wave characteristics in the nearshore waters of Sanmen bay[J]. Applied Ocean Research, 101: 102236.