



# 人工沙坝对沙滩剖面演化影响的 物理模型试验研究\*

胡啸宇<sup>1</sup>, 李佳贤<sup>2</sup>, 关明亮<sup>1</sup>, 蒙邦吉<sup>1</sup>, 马洪兵<sup>1</sup>, 王 侯<sup>1</sup>, 王 平<sup>3</sup>, 房克照<sup>2</sup>

(1. 长江南京航道工程局, 江苏南京 211899;

2. 大连理工大学, 海岸与海洋工程全国重点实验室, 辽宁大连 116024; 3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023)

**摘要:** 为探究人工沙坝对沙滩剖面演化的影响, 在波浪水槽中开展 JONSWAP 随机波浪作用下, 具有组合坡度的岸滩剖面动床物理模型试验。基于试验数据, 分析波浪传播、横向输沙和剖面变化特征, 讨论人工沙坝的安放位置、高度和中值粒径对岸滩剖面演化的影响。结果表明: 沙坝顶部剧烈的波浪破碎导致基频能量大幅下降, 透射系数最低降至 0.4, 沙坝后方出现明显的低频波浪成分, 高次谐波的运动变得更加复杂, 沙坝局部波浪非线性特征增强; 沙坝以推移质运动为主, 整体向岸输运, 起到向岸补沙作用, 滩面上部侵蚀、滩肩和滩面下部淤积, 而无沙坝时滩面以侵蚀和离岸输沙为主; 对于所考虑的试验工况, 沙坝高度对于滩面的防护效果影响最显著, 当沙坝顶高程与静水位持平时, 单宽侵蚀量、滩肩侵蚀深度和岸线蚀退距离分别下降 89%、69% 和 90%。

**关键词:** 人工沙坝; 岸滩剖面; 物理模型试验; 波浪水动力

中图分类号: U656.3; P753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0020-11

## Physical model experiment on effect of artificial sandbar on evolution of beach profile

HU Xiaoyu<sup>1</sup>, LI Jiaxian<sup>2</sup>, GUAN Mingliang<sup>1</sup>, MENG Bangji<sup>1</sup>, MA Hongbing<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, WANG Ping<sup>3</sup>, FANG Kezhao<sup>2</sup>

(1. Yangtze River Nanjing Navigation Engineering Bureau, Nanjing 211899, China;

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

3. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

**Abstract:** To investigate the influence of artificial sandbars on beach profile evolution, we conduct mobile-bed physical model experiments in a wave flume under JONSWAP random wave conditions, incorporating composite-slope beach profiles. On the basis of experimental data, we analyze the characteristics of wave propagation, cross-shore sediment transport, and profile evolution patterns, with a focus on the effects of sandbar placement, height, and median grain size. The results show that intense wave breaking at the sandbar crest induces a significant reduction in fundamental frequency energy and minimum transmission coefficient is 0.4, accompanying by prominent low-frequency wave components behind the sandbar, the motion of higher harmonics becomes more complex, and the nonlinear characteristics of local waves on the sandbar are enhanced. Sediment transport is dominated by bedload transport and facilitated onshore sand replenishment, resulting in upper beachface erosion combined with berm and lower beach face deposition, contrasting with consistent erosion and offshore sediment transport observed in non-sandbar configurations. Among the experimental conditions sandbar height exhibits the most pronounced protective effect to the beach face. When the sandbar crest aligns with still water level, unit-width erosion volume, berm erosion depth, and shoreline retreat distance decreases by 89%, 69%, and 90%, respectively.

**Keywords:** artificial sandbar; beach profile; physical model experiment; wave hydrodynamics

收稿日期: 2025-02-07

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(52071057, 52171247)

作者简介: 胡啸宇(1988—), 男, 工程师, 从事水运工程建设工作。

沙坝通常位于水深小于 10 m 的区域, 是砂质海岸常见的地貌单元<sup>[1-2]</sup>。沙坝的存在使得水深局部变浅, 导致入射波浪提前在离岸区破碎, 可以减少波浪作用在海滩上的能量, 从而起到降低海岸侵蚀的作用<sup>[3]</sup>, 这个机制被称为“掩护”效应<sup>[4]</sup>。近岸沙坝还可以降低强风暴期间冲泄区水流运动强度和海浪爬高, 有助于降低海岸淹没、沙丘和软崖侵蚀的风险<sup>[5]</sup>。现场观测表明, 在特定条件下, 人工沙坝会向岸侧迁移, 有助于海滩表层沉积物的补充<sup>[6-8]</sup>, 即发挥“喂养”效应。正是由于这两种效应的存在, 构筑人工沙坝被视为一种有效的砂质海岸侵蚀“软防护”措施。我国人工水下沙坝的应用始于 2008 年北戴河中直浴场应急治理工程<sup>[9]</sup>, 效果良好, 随后在河北省广泛推广, 应用于西海滩恢复治理工程<sup>[10]</sup>、老虎石公园及周边岬湾养滩工程等<sup>[11]</sup>, 在辽宁省大连市广鹿岛和营口市白沙湾砂质海岸生态修复工程中也采用了人工水下沙坝<sup>[12-13]</sup>。

修筑人工沙坝会骤然改变局部水深, 进而影响波浪传播、泥沙运输和砂质海岸形态演变<sup>[14]</sup>。由于这些过程时空间尺度差异大且相互耦合, 很难对其进行准确的数值模拟, 而可控条件下的物理模型试验是较为有效的研究手段。当前, 针对砂质海滩演变已开展过较多的物理模型试验研究, 但考虑人工沙坝参数变化影响的相对较少。Hwung 等<sup>[15]</sup>通过试验研究规则波作用下不同形状人工沙坝在斜坡岸滩剖面上的迁移, 提出累积输沙率的概念并将其与沙坝稳定性关联, 但试验中所用斜坡岸滩是定床, 因此没有考虑岸滩剖面变形的影响; Grasso 等<sup>[16]</sup>通过试验研究发现, 沙坝位于深水区“掩护”效应占优, 近岸沙坝则具有更好的“喂养”效应; 拾兵等<sup>[17]</sup>通过水槽试验发现, 规则波作用时, 随着水位升高, 沙坝上方的沙槽消失, 岸滩侵蚀和淤积区域均向岸移动, 且侵蚀面积扩大; Ma 等<sup>[18]</sup>的水槽模型试验表明, 沙坝上方波浪破碎会引起波浪能量的重新分布, 随机波作用下沙坝

向岸侧坡度变陡, 靠海侧坡度变缓; 赵多苍等<sup>[19]</sup>的水槽物理模型试验研究结果表明, 与无沙坝工况相比, 采用人工沙坝养滩效果明显, 岸滩泥沙淤积宽度与人工沙坝高程成正比; Li 等<sup>[20]</sup>开展人工沙坝存在时弱波浪条件下海滩剖面的演化过程试验, 发现推移质运动是人工沙坝向岸迁移的主要因素, 输沙强度随着剖面趋向平衡而降低。

本文开展侵蚀性波浪作用下复合坡度岸滩剖面演化的波浪水槽物理模型试验, 基于详细的测量数据, 重点分析波高、波谱、波面偏斜度以及横向输沙率的空间变化, 讨论人工沙坝特征参数如安装位置、高度和中值粒径对波浪传播演化、横向输沙率和岸滩剖面变形的影响。

## 1 物理模型试验

试验在大连理工大学海岸与海洋工程全国重点实验室波浪水槽中进行, 水槽长 50 m、宽 3 m、深 1 m, 两端设有消浪设施, 见图 1。用中值粒径  $d_{50}=0.16$  mm 的石英沙在水槽后部填筑具有复合坡度的岸滩剖面, 总长度 11.8 m, 其中滩肩宽 1.84 m, 滩肩前沿高程 0.1 m, 向陆侧呈阶梯状抬升, 至滩肩后缘高程 0.15 m, 滩面坡度 1:4, 其向海侧依次连接坡度 1:140、1:20 和 1:100 的复合坡度海床。沙坝顶宽 0.8 m, 向岸侧和向海侧坡度分别为 1:1.2 和 1:4, 各工况沙坝的离岸距离、顶高程和沉积物构成见表 1。其中, 工况 1~5 沙坝安装位置不同, 工况 3、6、7 沙坝顶高程不同, 工况 3 和 8 沙坝的中值粒径不同, 工况 9 为对照组次, 无沙坝。试验水深 0.35 m, 采用 JONSWAP 随机波浪(有效波高  $H_s=0.1$  m, 谱峰周期  $T_p=1.4$  s, 谱峰增强因子 3.3) 作为入射波浪。根据 Sunamura 等<sup>[21]</sup>提出的海滩剖面形态判断准则, 即:

$$C = H_0/L_0(d_{50}/L_0)^{-0.67}(\tan\beta)^{0.67} \quad (1)$$

式中:  $C$  为沙滩侵蚀类型的无量纲指标;  $H_0$  与  $L_0$  分别为深水波高和波长;  $\beta$  为沙滩近岸坡度。

本文通过计算得到  $C>8$ , 表明该波浪条件下沙滩为侵蚀型剖面。

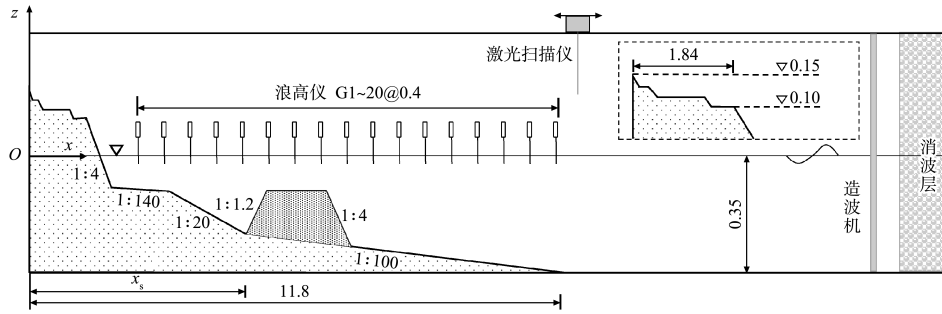


图 1 试验布置 (单位: m)

Fig. 1 Layout of experiment (unit: m)

表 1 试验工况

Tab. 1 Experiment cases

工况	沙坝位置 $x_s/m$	沙坝高程/m	沙坝中值粒径/mm
1	4.77	-0.03	0.80
2	5.88	-0.03	0.80
3	7.06	-0.03	0.80
4	8.24	-0.03	0.80
5	9.41	-0.03	0.80
6	7.06	0	0.80
7	7.06	-0.055	0.80
8	7.06	-0.03	0.16
9	-	-	-

自  $x = 2.7$  m 处起以 0.4 m 间隔布置 20 支 SG200 型电容式波高计测量波面升高(编号依次为 G1~20)。点式激光测距仪沿水槽上方轨道滑动采集沙滩高程,水平位置测量精度为  $\pm 3.0$  mm,高程测量精度为  $\pm 2.0$  mm。测量时,轨道距水槽边壁玻璃约 0.3 m,尽量避免边壁效应带来的沙滩剖面在水槽横向产生的不一致现象。保持水位不变,波浪累计作用约 150 min 后沙滩剖面基本达到平衡状态,此时采集波面升高和沙滩高程,用于后续数据分析。

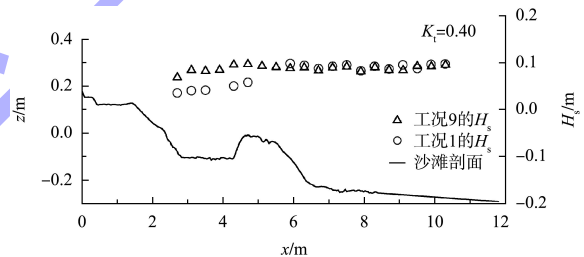
## 2 试验结果与分析

### 2.1 水动力演化分析

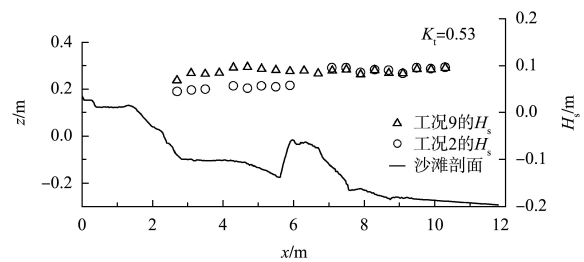
#### 2.1.1 波高空间分布和透射系数

不同工况下沙滩剖面达到平衡后有效波高  $H_s$  沿水槽的分布见图 2,其中部分工况沙坝上方的数据缺失是因为该处水深太浅无法布置浪高仪。可以看出,在离岸深水区,所有工况的波高基本相同,均等于入射波高 0.1 m。当波浪经过沙坝的向

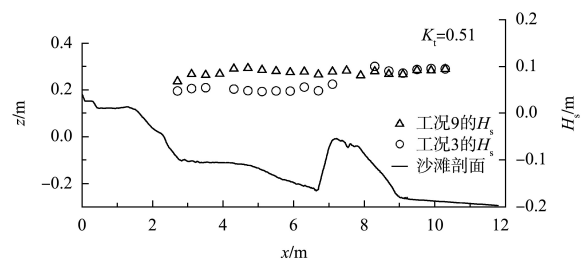
海侧斜坡时,因为浅化作用局部波高有所增加(例如,工况 3 约为  $x = 8$  m 处,工况 4 约为  $x = 10$  m 处),这与文献[20]观察到的现象类似。沙坝顶部水深变浅,导致波浪剧烈破碎和能量耗散,因此沙坝后方的波高明显降低,沙坝至岸线区域波高虽有一定的波动但变化不大。无沙坝时(工况 9),波高沿程变化不明显,仅在近岸浅水区才发生波浪破碎和波高降低,表明更多的波能会作用于滩面。



a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3

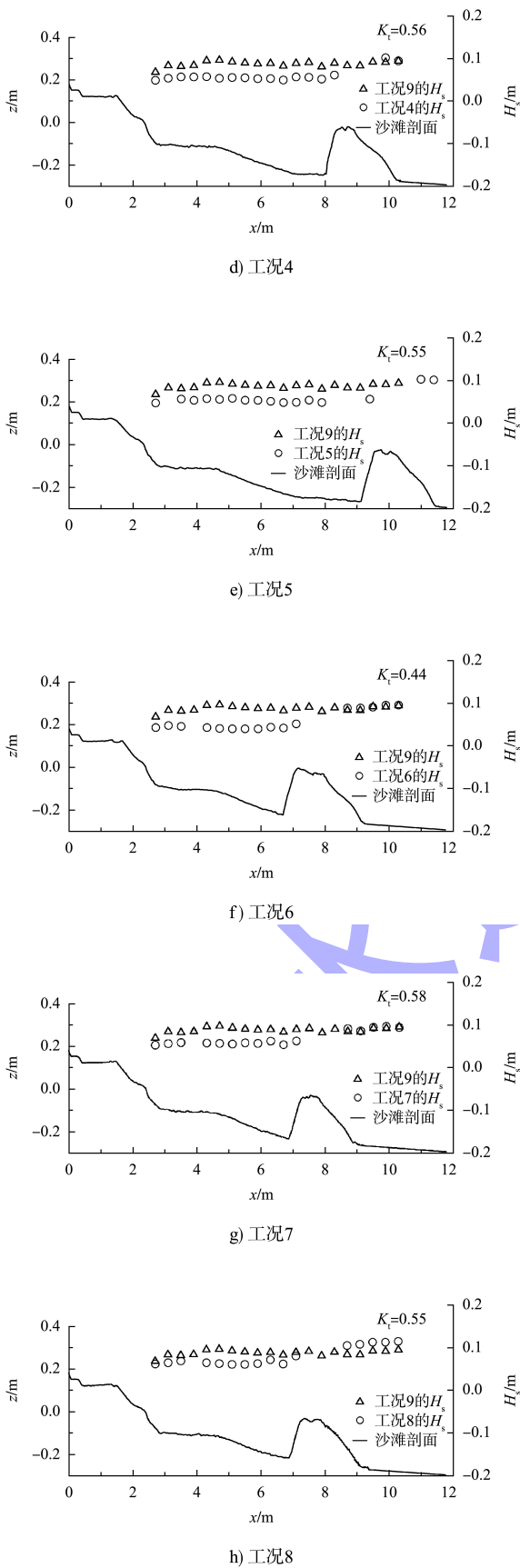


图 2 波高的空间变化

Fig. 2 Spatial variation of wave height

图 2 也给出各工况的透射系数  $K_t = H_t/H_i$  (其中,  $H_t$  为沙坝后的透射波高, 采用从沙坝到岸线的波高平均值,  $H_i$  为沙坝前方入射波高, 为避免反射波干扰, 统一取为入射波高 0.1 m)。工况 1~5 仅沙坝安装位置不同, 工况 1 的透射系数最小(0.40), 随着安装位置向海侧移动, 透射系数在工况 2 时增大到 0.53, 在工况 3 中减小到 0.51, 在工况 4 和 5 中增大至 0.56 和 0.55。由于在沙坝和岸线区域诸多水动力过程并存, 如高次谐波和低频波的产生、波浪重组、波浪在岸线处的破碎和爬高、以及波浪反射等, 因此很难清晰地解释工况 4 中波浪透射系数最大的原因。工况 6、3 和 7 仅在沙坝高度上有差异, 沙坝上方水深分别为 0.0、0.03 和 0.055 m, 对应的透射系数分别为 0.44、0.51 和 0.58, 表明淹没深度越小的沙坝消浪效果越好。工况 3 与 8 仅沙坝的中值粒径不同, 两者对应的透射系数分别为 0.51 和 0.55, 说明泥沙粒径较粗的沙坝在极端波浪作用下具有更好的稳定性, 因此消浪效果更佳, 但差别并不明显。

### 2.1.2 频谱

不同工况频谱的空间变化见图 3, 其中  $f$  为频率,  $S(f)$  为频谱密度。可以看出, 无沙坝时(工况 9)各浪高仪处的频谱形态基本一致, 波能集中在基频附近, 幅值约为  $25 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ , 至近岸处(G1)由于波浪破碎基频能量发生衰减, 幅值降为  $9 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$  左右; 波浪传播演化过程中, 在  $x$  为 4~6 m 区域产生了高次谐波, 主要是由于变浅以及非线性作用造成的, 波浪破碎释放或者诱发的低频波浪成分在近岸处可见, 但幅值较小, 约为  $3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 。修筑沙坝后, 沙坝后方的频谱形态发生显著变化: 1) 沙坝上方波浪的破碎导致沙坝后方至岸线区域基频波浪能量大幅度衰减, 频谱能量幅值降低至  $2 \sim 7 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ ; 2) 沙坝后方产生了较明显的低频波浪成分(如工况 1、3~8 沙坝向陆侧附近位置), 低频波浪可由波浪破碎导致的辐射应力梯度变化诱发, 或是波群中长波的能量释放和反射引起的, 也可能是波



浪破碎点的空间移动造成的<sup>[22]</sup>；沙坝位置、高程和波浪作用后形态的变化以及沙坝上方的波浪破碎过程导致高频波浪的产生和传播过程更加复杂，其幅值强度和出现位置有所变化。

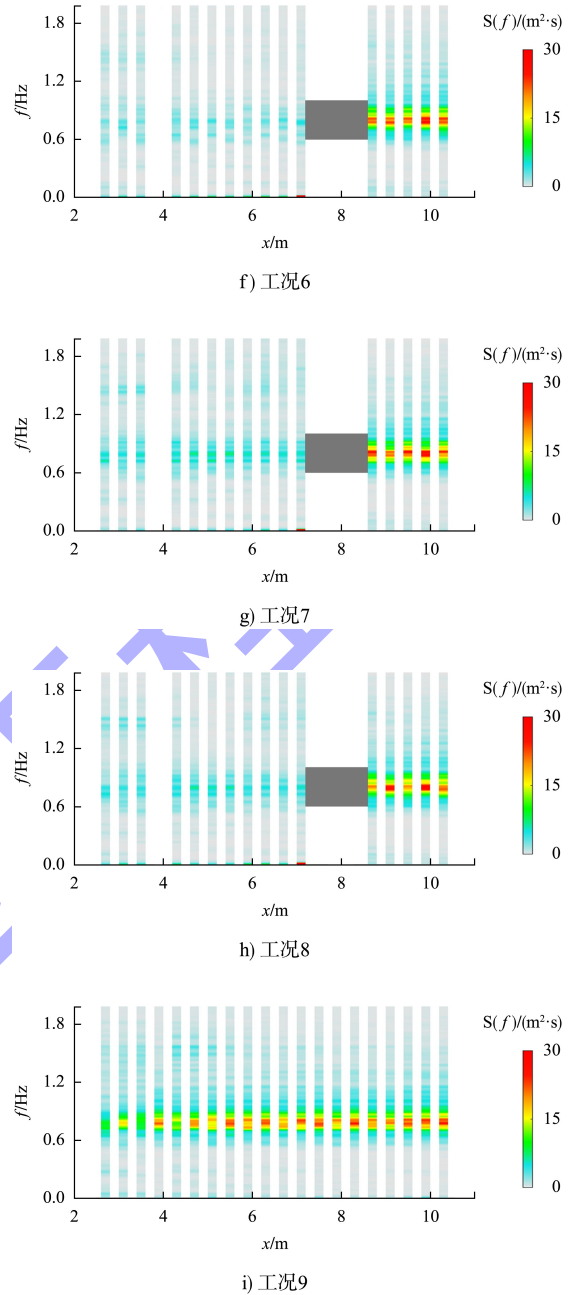
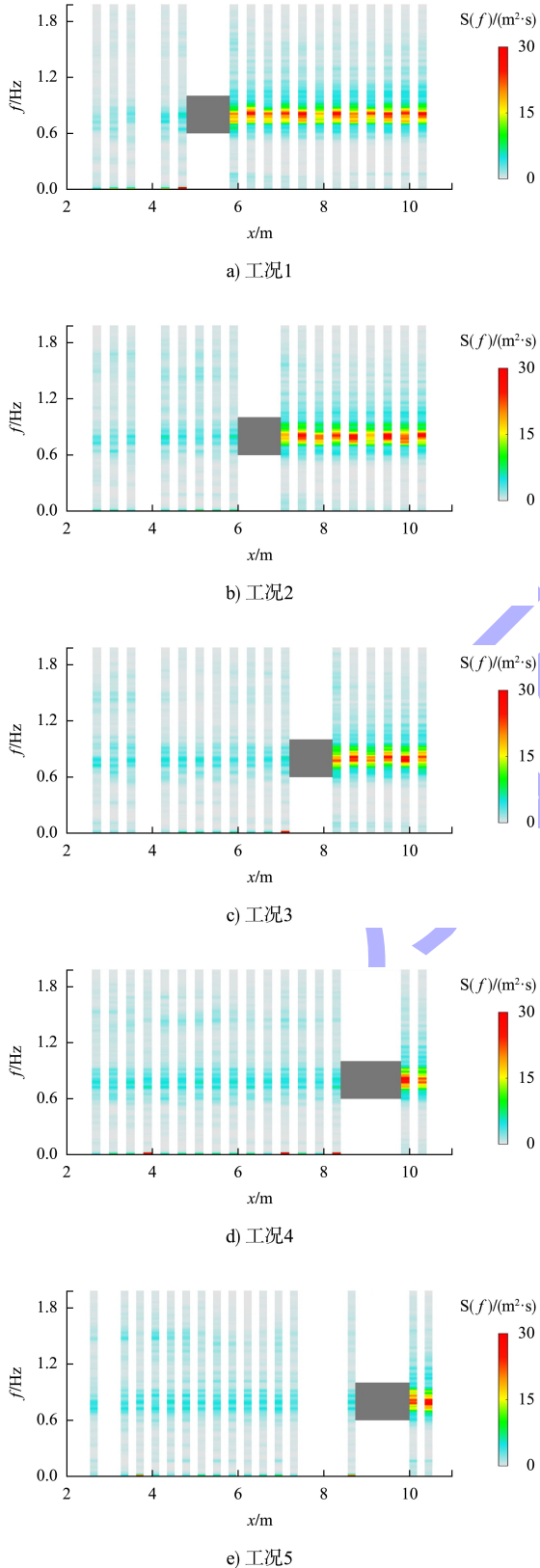


图3 频谱的空间变化  
Fig. 3 Spatial variation of wave spectrum

### 2.1.3 波浪非线性

波浪偏度  $S_k$  (波峰与波谷的不对称程度) 和斜度  $A_s$  (波浪剖面的不对称性) 是表征波浪非线性和向岸输沙的关键参数<sup>[23-24]</sup>，定义为：

$$S_k = \frac{\langle (\eta - \bar{\eta})^3 \rangle}{\langle (\eta - \bar{\eta})^2 \rangle^{3/2}} \quad (2)$$

$$A_s = \frac{\langle H(\eta - \bar{\eta})^3 \rangle}{\langle (\eta - \bar{\eta})^2 \rangle^{3/2}} \quad (3)$$

式中， $\eta$  为波面高程； $H$  为希尔伯特变换；尖括

号和横线表示时间平均算子。

波浪偏度和斜度的空间变化见图 4。可以看出, 无沙坝时(工况 9), 随着波浪从深水传至浅水,  $S_k$  从 0.5 逐渐增大到 1, 表明波峰变得高和尖, 波谷变得浅和平, 在岸线处由于波浪破碎非线性强度下降。波浪越接近近岸区,  $A_s$  的绝对值增加, 表明波浪的前坡比后坡更陡, 即波剖面向前倾斜。Kennedy 等<sup>[25]</sup>在斜坡海岸上随机波传播的模型试验和数值计算时均发现了类似的现象。沙坝附近  $S_k$  和  $A_s$  的绝对值均大幅度增加, 说明沙坝的存在显著增强了局部的波浪非线性特征, 这与文献[19]的结论一致。经过沙坝后, 波浪的偏斜与斜度均出现了减小且呈现波动, 这可能与波浪破碎、重组、相互作用和高阶谐波产生等原因有关。

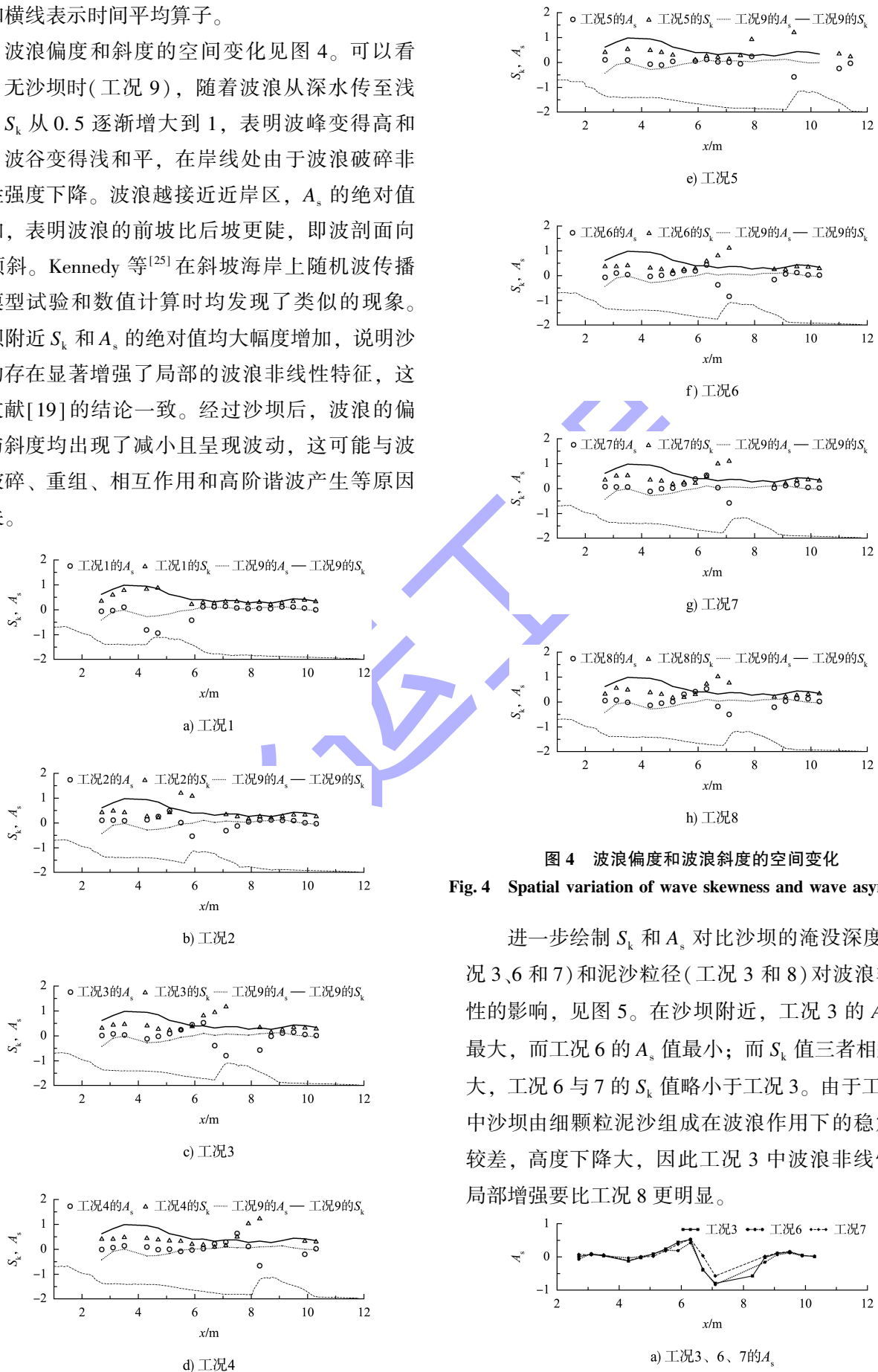
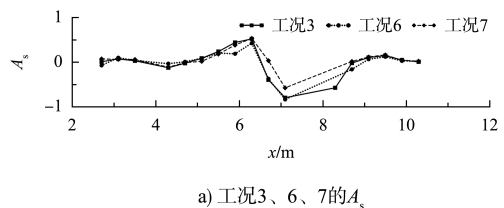


图 4 波浪偏度和波浪斜度的空间变化

Fig. 4 Spatial variation of wave skewness and wave asymmetry

进一步绘制  $S_k$  和  $A_s$  对比沙坝的淹没深度(工况 3、6 和 7)和泥沙粒径(工况 3 和 8)对波浪非线性的影响, 见图 5。在沙坝附近, 工况 3 的  $A_s$  值最大, 而工况 6 的  $A_s$  值最小; 而  $S_k$  值三者相差不多, 工况 6 与 7 的  $S_k$  值略小于工况 3。由于工况 8 中沙坝由细颗粒泥沙组成在波浪作用下的稳定性较差, 高度下降大, 因此工况 3 中波浪非线性的局部增强要比工况 8 更明显。



a) 工况 3、6、7 的  $A_s$

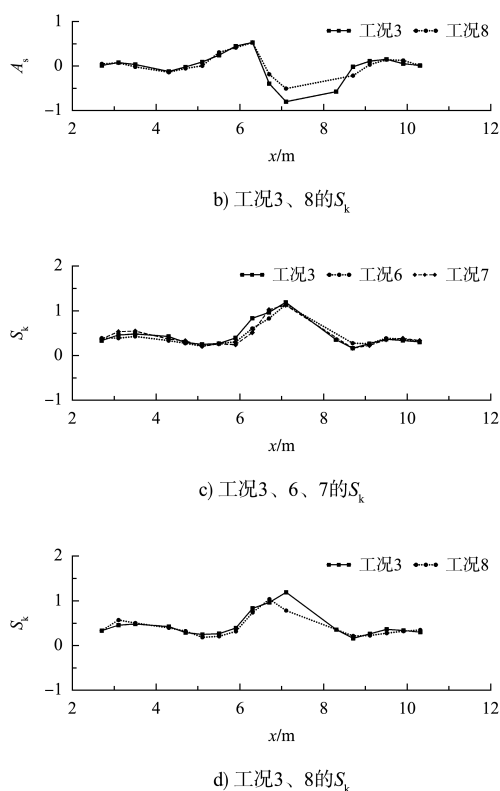


图5 不同沙坝下波浪偏度和波浪斜度对比

Fig. 5 Comparison of wave skewness and wave asymmetry for different sandbar configurations

## 2.2 沙滩剖面演化分析

### 2.2.1 沙滩剖面形态

沙滩剖面的演变由泥沙质量守恒方程控制, 为:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

式中:  $z_b$  为床面高程;  $t$  为时间;  $n$  为泥沙孔隙率 (取 0.4);  $q$  为输沙率。

沙滩剖面演化是离岸沉积物运输与向岸沉积物运输之间综合作用的结果, 目前广泛认为离岸沉积物的输运主要是由波浪破碎相关的向海平均回流引起的, 而向岸沉积物的输运则与变浅区和冲刷区的波浪非线性相关, 如波浪偏度和波浪斜度等有关。试验中发现, 在给定波浪长时间作用下, 所有工况中的岸滩剖面都从其初始形状演变到平衡状态, 剖面变形明显区域集中在沙坝和滩面, 基本与波浪破碎的位置相对应, 见图 6。

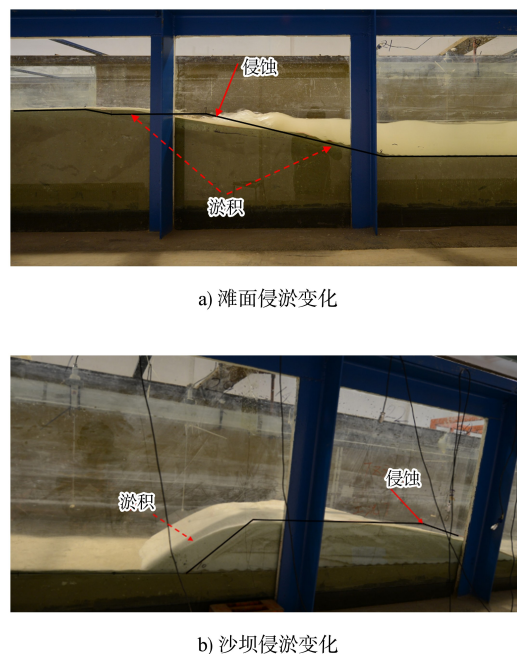


图6 滩面和沙坝变形情况

Fig. 6 Situation of beach face and sandbar evolution

式(4)中  $q$  的值与时间有关, 在试验过程中很难记录。因此, 采用式(5)计算在  $\Delta t$  时间段内的平均输沙率  $\bar{q}$ :

$$\bar{q}(x_i) = \bar{q}(x_{i-1}) - \int_{x_{i-1}}^{x_i} (1-n) \frac{\Delta z_b}{\Delta t} dx \quad (5)$$

$\bar{q} > 0$  表示泥沙向岸运输,  $\bar{q} < 0$  则表示离岸运输。本文试验  $\Delta t$  设为 150 min (即沙滩剖面从初始到平衡所持续的时间)。

各工况沙滩剖面达到平衡后对应的剖面形态和平均输沙率见图 7。试验中发现, 由于泥沙粒径较粗, 工况 1~7 沙坝区域泥沙以推移质运动为主, 即便在剧烈的破碎波作用下少量泥沙发生悬移也会很快落淤; 人工沙坝向岸迁移, 向海坡度变缓, 向岸坡度保持稳定, 虽然在顶部出现了一些波动, 但沙坝的整体形状保持较好, 其中工况 1、3~7 由于泥沙淤积沙坝局部高度有所增加。对于工况 8, 由于采用了细沙填筑沙坝, 沙坝区域泥沙以悬移质为主, 最初的梯形沙坝在向岸和向海方向均发生扩散, 相较于工况 3, 不仅沙坝高度有所降低, 对应的波浪透射系数也略有增大。由此可见, 采用粗沙建造人工沙坝是更优的选择。在所有工况下, 岸线及其附近的斜坡滩面都受到侵蚀, 其中

波浪破碎会引起泥沙悬移, 部分泥沙随着海底回流流向离岸方向运输, 并沉降形成淤积, 粗沙则在冲泄区上冲流的作用下向岸移动并淤积, 最终滩面呈下凹形态, 坡度较缓, 岸线后退。在没有人工沙坝的情况下, 工况 9 的侵蚀程度比其他工况大。

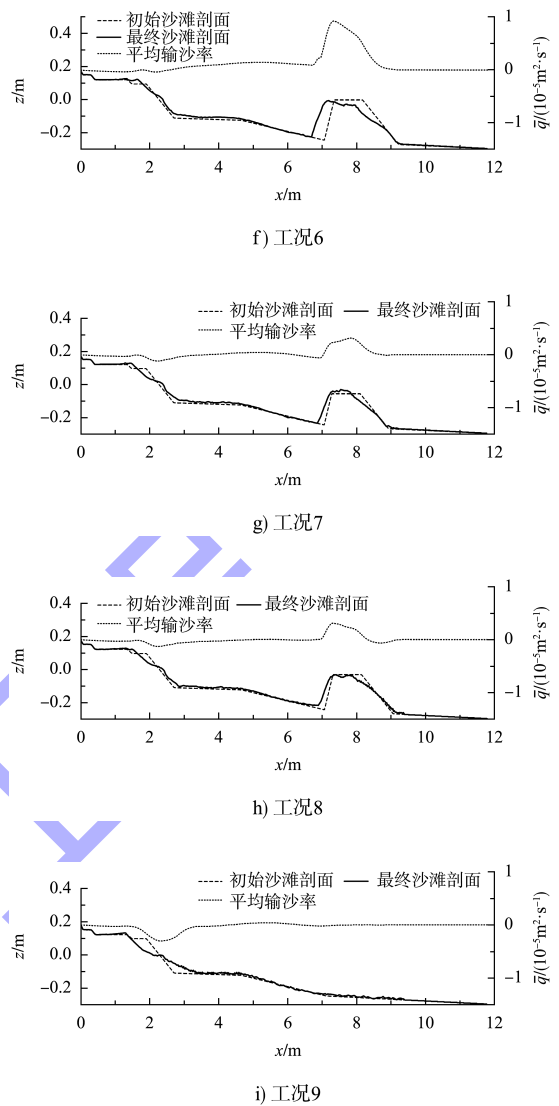
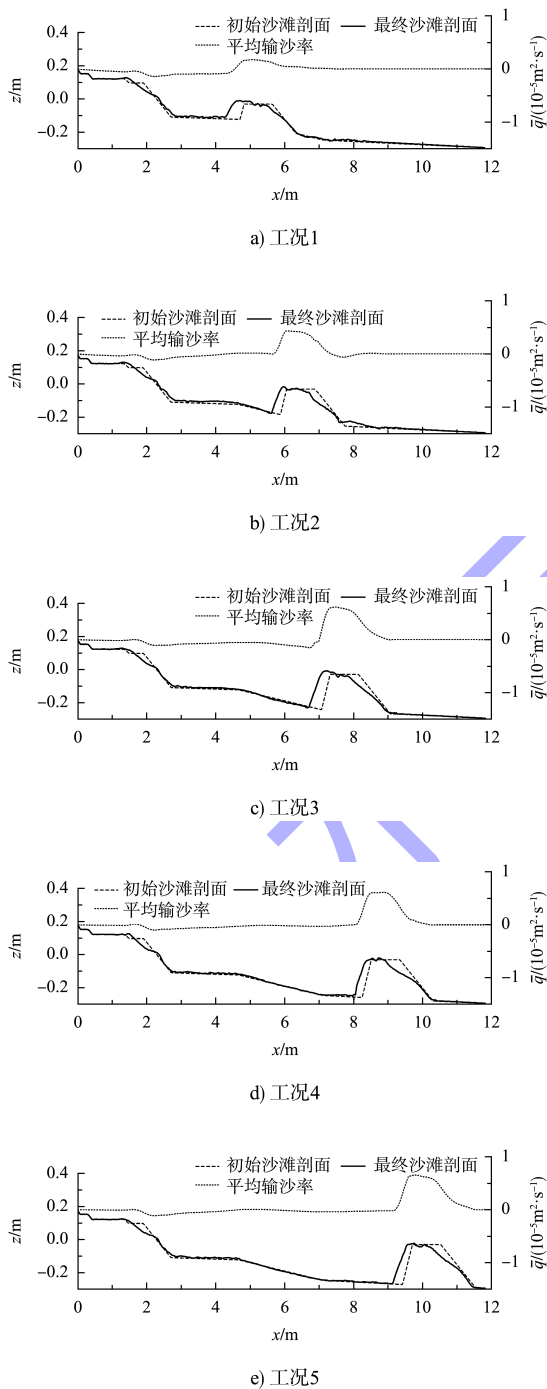


图 7 沙滩剖面和平均输沙率的空间变化  
 Fig. 7 Spatial variation of beach profile and mean sand transport rate

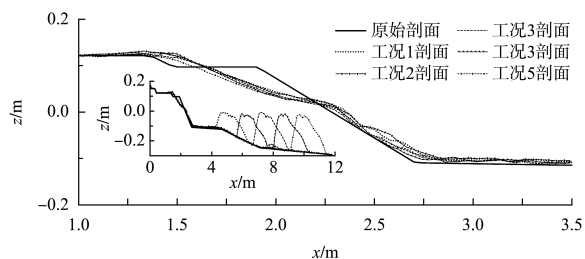
由图 7 可见, 工况 1~8 的平均输沙速率形态较为相似, 原因为: 1) 人工沙坝处有较大的向岸输沙。波浪偏度和斜度的非线性程度在沙坝上增加(图 5), 表明有相当大的向岸输沙量。在试验中目测发现, 与波浪破碎相关的回流在此过程中仅起次要作用, 特别是对于由较粗泥沙构成的人工沙坝。2) 在岸线附近可以同时看到向岸和离岸输沙。当波浪靠近岸线并发生破碎时, 滩面处较细的泥沙会被搅动并被回流带到深水, 向岸输沙



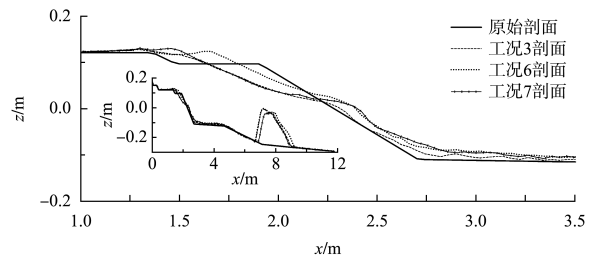
量由冲泄区的波浪上冲流所致。工况 8 使用更细的沙子 ( $d_{50} = 0.16 \text{ mm}$ ) 建造沙坝, 沙坝的稳定性稍差, 波浪作用后高程降低, 消浪能力随之减弱, 在滩面处可以观察到更为剧烈的向岸和离岸输沙运动。如果没有沙坝(工况 9), 离岸输沙量会因为剧烈的波浪破碎和海底回流而明显增加。

### 2.2.2 沙滩剖面侵蚀

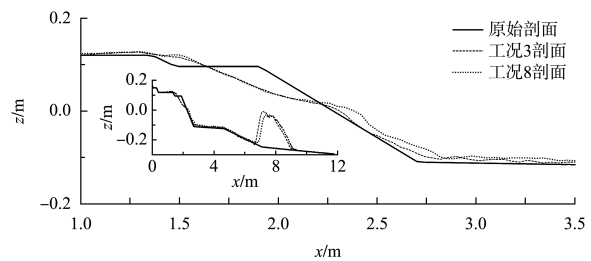
沙坝不同配置下沙滩平衡剖面形态的对比见图 8。沙滩剖面各侵蚀指标见图 9, 包括岸线蚀退距离、滩肩侵蚀深度和近岸滩面的侵蚀量。各工况沙滩侵蚀指标值见表 2。整体来看, 与无沙坝(工况 9)的工况相比, 沙坝的存在显著降低了滩肩侵蚀深度、岸线蚀退距离和单宽侵蚀量, 说明建造人工沙坝有利于减少滩面的侵蚀情况, 其中单宽侵蚀量由  $0.0374 \text{ m}^3/\text{m}$  降低至  $0.0041 \sim 0.0170 \text{ m}^3/\text{m}$ , 滩肩侵蚀深度由  $0.064 \text{ m}$  降低至  $0.020 \sim 0.052 \text{ m}$ , 岸线蚀退距离由  $0.40 \text{ m}$  降低至  $0.04 \sim 0.22 \text{ m}$ 。对比工况 1~5 的各项侵蚀指标值发现, 随着沙坝离岸距离的增加, 各项侵蚀指标值略微增加, 表明沙坝离岸越近, 对滩面的保护作用越强; 对比工况 3 与 8 发现, 沙坝中值粒径增大后, 滩面的单宽侵蚀量和滩肩侵蚀深度有所降低, 岸线蚀退距离保持不变, 总体防护效果有所提升但并不明显, 这与 2.1.1 节中对透射系数的分析结果一致; 工况 6 的 3 项指标相较于其他工况大幅减少, 而其他工况间差异并不显著, 表明沙坝顶高程对于滩面的防护效果影响显著。



a) 原始剖面与工况1~5剖面



b) 原始剖面与工况3、6、7剖面



c) 原始剖面与工况3、8剖面

图 8 沙坝不同位置时的沙滩剖面形态对比

Fig. 8 Comparison of beach profile under different installation locations of sandbars

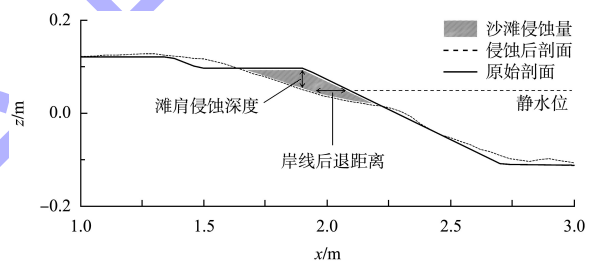


图 9 沙滩侵蚀指标

Fig. 9 Indexes of beach erosion

表 2 各工况沙滩侵蚀指标值  
Tab. 2 Beach erosion index values under various working conditions

工况	单宽侵蚀量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ )	滩肩侵蚀 深度/m	岸线蚀退 距离/m
1	0.011 8	0.040	0.12
2	0.012 1	0.042	0.16
3	0.014 6	0.046	0.18
4	0.015 9	0.049	0.20
5	0.017 0	0.052	0.22
6	0.004 1	0.020	0.04
7	0.014 2	0.048	0.19
8	0.014 6	0.047	0.18
9	0.037 4	0.064	0.40

### 3 结论

1) 人工沙坝的存在显著改变了波浪传播过程。沙坝顶部的剧烈波浪破碎导致入射波高的大幅降低, 基频能量随之下降, 沙坝后方出现明显的低频波浪成分, 高次谐波的运动变得更加复杂, 沙坝局部波浪非线性特征增强。

2) 人工沙坝的存在显著改变了滩面泥沙输运和侵蚀形态。沙坝区域以推移质运动为主, 整体向岸输运; 无沙坝时滩面泥沙以离岸输运为主, 有沙坝时滩面被侵蚀的泥沙存在向岸输运和离岸输运两部分, 与之对应, 滩面上部侵蚀、滩肩淤积和滩面下部淤积, 平衡剖面呈下凹形态。

3) 统计单宽侵蚀量、滩肩侵蚀深度和岸线蚀退距离等关键指标发现, 人工沙坝可以显著降低侵蚀性波浪对滩面的侵蚀程度。对于本文所考虑的试验条件, 沙坝高度对于滩面的防护效果影响最显著, 当沙坝顶高程与静水位持平时, 单宽侵蚀量、滩肩侵蚀及深度和岸线蚀退距离分别下降89%、69%和90%, 沙坝安装位置越靠近岸边浅水区效果越好, 沙坝中值粒径的影响不明显。

4) 本文对砂质海岸侵蚀修复工程有一定的借鉴意义, 但是试验仅针对特定剖面形态和波浪条件开展, 也没有分析比尺效应带来的不确定性, 需要开展更多的试验组次提高结论的泛化性。

### 参考文献:

- [1] 潘毅, 薛仕磊, 王雪迎, 等. 人工水下沙坝研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(9): 1295-1302.  
PAN Y, XUE S L, WANG X Y, et al. A review of studies on submerged berms [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2022, 50(9): 1295-1302.
- [2] ALEMAN N, CERTAIN R, ROBIN N, et al. Morphodynamics of slightly oblique nearshore bars and their relationship with the cycle of net offshore migration[J]. Marine geology, 2017, 392: 41-52.
- [3] DUBARBIER B, CASTELLE B, MARIEU V, et al. Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior [J]. Coastal engineering, 2015, 95: 35-50.
- [4] VAN DUIN M J P, WIERSMA N R, WALSTRA D J R, et al. Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands [J]. Coastal engineering, 2004, 51(8/9): 813-837.
- [5] SALLENGER JR A H, HOLMAN R A, BIRKEMEIER W A. Storm-induced response of a nearshore-bar system [J]. Marine geology, 1985, 64(3/4): 237-257.
- [6] MARINHO B, COELHO C, LARSON M, et al. Cross-shore modelling of multiple nearshore bars at a decadal scale [J]. Coastal engineering, 2020, 159: 103722.
- [7] 杨玉宝, 潘毅, 陈永平, 等. 低能砂质海岸人工水下沙坝剖面的演变分析 [J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2019, 34(2): 232-237.  
YANG Y B, PAN Y, CHEN Y P, et al. Analysis of the evolution of beach profiles in a low-energy sandy beach with a submerged berm [J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2019, 34(2): 232-237.
- [8] PAN Y, KUANG C P, ZHANG J B, et al. Postnourishment evolution of beach profiles in a low-energy sandy beach with a submerged berm [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2017, 143(4): 05017001.
- [9] 杨燕雄, 邱若峰, 邹志利, 等. 北戴河海滩养护方案实验研究 [J]. 水运工程, 2010(4): 18-23.  
YANG Y X, QIU R F, ZOU Z L, et al. Experimental study on nourishment of Beidaihe beach [J]. Port & waterway engineering, 2010(4): 18-23.
- [10] 杨燕雄, 张甲波, 刘松涛. 秦皇岛海滩养护工程的实践与方法 [J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 1-15.  
YANG Y X, ZHANG J B, LIU S T. What we have learnt from the beach nourishment project in Qinhuangdao [J]. Marine geology frontiers, 2014, 30(3): 1-15.
- [11] KUANG C P, MAO X D, GU J, et al. Morphological processes of two artificial submerged shore-parallel sandbars for beach nourishment in a nearshore zone [J].

- Ocean & coastal management, 2019, 179: 104870.
- [12] 大连市人民政府. 大连市蓝色海湾整治行动实施方案[R]. 大连: 大连市人民政府, 2016.
- The People's Government of Dalian Municipality. Implementation plan for the "blue bay marine eco-environment protection" in Dalian [R]. Dalian: The People's Government of Dalian Municipality, 2016.
- [13] 王平, 董祥科, 孙家文. 渤海海洋生态修复保护规划设计及工程实践[M]. 北京: 海洋出版社, 2023.
- WANG P, DONG X K, SUN J W. Planning, design, and engineering practice of Bohai marine ecological restoration and protection[M]. Beijing: Ocean Press, 2023.
- [14] KUANG C P, HAN X J, ZHANG J B, et al. Morphodynamic evolution of a nourished beach with artificial sandbars: field observations and numerical modeling[J]. Journal of marine science and engineering, 2021, 9(3): 245-274.
- [15] HWUNG H H, HUANG Z C, HWANG K S. An experimental study of the cross-shore evolution of artificial submerged sand bars [J]. Coastal engineering journal, 2010, 52(4): 261-285.
- [16] GRASSO F, MICHALLET H, BARTHÉLEMY E. Experimental simulation of shoreface nourishments under storm events: a morphological, hydrodynamic, and sediment grain size analysis [J]. Coastal engineering, 2011, 58(2): 184-193.
- [17] 拾兵, 于冬, 赵恩金, 等. 水位变化对近岸人工沙坝养滩效果影响的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 104-110.
- SHI B, YU D, ZHAO E J, et al. Experimental study on effect of beach nourishment with the offshore artificial sandy bar response to water level change [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(1): 104-110.
- [18] MA Y, KUANG C, Han X J. Morphological responses of a submerged artificial sandbar to irregular waves [C]// International Society of Offshore and Polar Engineers. The Proceedings of the Thirteenth (2018) Pacific-Asia Offshore Mechanics Symposium. Mountain View: ISOPE, 2018: 89-95.
- [19] 赵多苍, 白玉川, 拾兵. 人工沙坝消波和养护海滩性能研究[J]. 海洋湖沼通报, 2020(2): 100-106.
- ZHAO D C, BAI Y C, SHI B. Study on the properties of weakening wave and beach nourishment by artificial sand bar [J]. Transactions of oceanology and limnology, 2020(2): 100-106.
- [20] LI Y, ZHANG C, CAI Y, et al. Wave dissipation and sediment transport patterns during shoreface nourishment towards equilibrium [J]. Journal of marine science and engineering, 2021, 9(5): 1-22.
- [21] SUNAMURA T, HORIKAWA K. Two dimensional beach transformation due to waves [C]//ASCE. 14th International Conference on Coastal Engineering. New York: ASCE, 1973: 920-938.
- [22] BERTIN X, DE BAKKER A, VAN DONGEREN A, et al. Infragravity waves: from driving mechanisms to impacts [J]. Earth-science reviews, 2018, 177: 774-799.
- [23] HSU T J, ELGAR S, GUZA R T. Wave-induced sediment transport and onshore sandbar migration [J]. Coastal engineering, 2006, 53(10): 817-824.
- [24] NIELSEN P. Sheet flow sediment transport under waves with acceleration skewness and boundary layer streaming [J]. Coastal engineering, 2006, 53 ( 9 ): 749-758.
- [25] KENNEDY A B, CHEN Q, KIRBY J T, et al. Boussinesq modeling of wave transformation, breaking, and runup. I: one dimension [J]. Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering, 2000, 126(1): 39-47.

(本文编辑 王璁)