

李元, 张弛. 近岸人工沙坝的剖面演变规律和泥沙输运机制研究综述[J]. 海洋学报, 2023, 45(5): 79–89, doi:10.12284/hyxb070

Li Yuan, Zhang Chi. Review on morphological evolution of nearshore artificial sandbar and underlying sediment transport mechanisms[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(5): 79–89, doi:10.12284/hyxb070

# 近岸人工沙坝的剖面演变规律和泥沙输运机制研究综述

李元<sup>1,2</sup>, 张弛<sup>1,2\*</sup>

(1. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 近岸人工沙坝养滩是一种重要的海滩养护手段, 开展人工沙坝地形演变研究是海岸带保护修复工程的重要需求。本文围绕不同动力条件下的人工沙坝横向迁移规律、形态演变模式、地貌耦合规律和水沙运动机制等理论层面, 以及人工沙坝平衡剖面描述和演变过程数值模拟等方法层面, 总结了近年来关于人工沙坝剖面演变规律和泥沙输运机制的国内外研究进展, 并提出了关键过程机理深化、模拟预测方法改进和实际养滩工程应用等方面的今后研究重点。

**关键词:** 海滩养护修复; 近岸人工沙坝; 海滩剖面演变; 海岸水沙运动

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)05-0079-11

## 1 引言

近岸人工沙坝养滩是海滩养护的一种典型方式<sup>[1-4]</sup>, 通过将泥沙抛填形成人工沙坝, 削减波能并依靠自然波浪作用下的向岸输沙来养护海滩。人工沙坝具有养滩成本低、施工效率高、养滩周期长、对海滩活动和自然景观影响小等优点<sup>[5-9]</sup>, 是逐渐兴起和极具发展潜力的海滩养护方式<sup>[2-3, 7, 10-17]</sup>。人工沙坝的养滩功能主要体现在“遮蔽效应”和“喂养效应”两个方面。“遮蔽效应”是指人工沙坝可引起波浪破碎和能量耗散, 减弱后方的输沙能力, 抑制海滩侵蚀<sup>[3, 18-20]</sup>。“喂养效应”是指人工沙坝在自然波浪作用下向岸迁移并填补在滩面上, 形成对海滩的养护<sup>[21]</sup>。

人工沙坝可视为天然地形上的人为扰动, 与当地的水动力条件并不匹配。因此, 人工沙坝往往会经历剧烈的地形变化, 其中涉及的水沙运动过程较为复杂<sup>[22]</sup>。在波浪演化层面上, 人工沙坝引起的地形突变将对波浪传播变形规律产生显著的影响。在泥沙运

动层面上, 人工沙坝作为泥沙“源”, 间接改变了海滩剖面上的泥沙输运特征<sup>[23-26]</sup>。在地形演变层面上, 现有的天然沙坝形成与演变理论将不再适用于人工沙坝。深入研究人工沙坝的剖面演变规律和泥沙输运机制不仅是海岸工程学科的前沿研究热点<sup>[27-42]</sup>, 也是海岸带保护修复工程建设的实际需求<sup>[43-46]</sup>。

本文从波浪作用下人工沙坝剖面演变规律入手, 总结了不同动力条件下的人工沙坝横向迁移、形态演变和地貌耦合规律, 探讨了人工沙坝平衡剖面形态特征与动力适应性, 介绍了人工沙坝演变过程中的泥沙输运机制与数值模拟方法的主要研究进展, 最后提出未来的研究展望。

## 2 波浪作用下人工沙坝剖面演变规律

### 2.1 人工沙坝横向迁移规律

海岸沙坝横向迁移是海滩地貌响应的主要表现形式之一。国内外学者对天然沙坝的横向迁移开展了大量研究<sup>[47]</sup>, 发现天然沙坝的迁移趋势往往与海滩

收稿日期: 2021-12-16; 修订日期: 2023-01-12。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51879096); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52201317)。

作者简介: 李元(1994—), 男, 江苏省常州市人, 博士, 主要从事海岸水沙运动与沙滩地形演变研究。E-mail: yuan.li@hhu.edu.cn

\* 通信作者: 张弛, 男, 教授, 主要从事海岸整治修复与海滩养护方面的研究。E-mail: zhangchi@hhu.edu.cn

波浪动力条件相匹配,如天然沙坝在弱动力条件下向岸迁移并促进滩肩剖面的形成,在强动力条件下离岸迁移并促进沙坝剖面的形成。然而,人工沙坝的地貌形态比天然沙坝更加显著,主要体现在更浅的坝顶水深和更陡的两侧边坡,因此也表现出更为复杂的横向迁移规律。

已有的人工沙坝横向迁移规律认识主要来自于对原型海岸的现场观测研究。此类现场观测研究的重点在于考察人工沙坝在平常波浪作用下是否能够向岸迁移并喂养海滩,观测时间尺度通常在数月甚至数年不等,侧重于人工沙坝的中长期演变规律。Brutsché 等<sup>[48]</sup>基于3年现场观测数据,发现美国 Fort Myers 海岸上的人工沙坝在当地较弱的波浪作用下缓慢向岸迁移并填补干滩。荷兰 Terschelling 海岸上的人工沙坝填充在两个天然沙坝之间的深槽中,填沙量为  $200 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,在建成后10年内有较明显的向岸迁移趋势<sup>[49]</sup>。Ojeda 等<sup>[50]</sup>基于6年的观测资料,发现荷兰 Noordwijk 海岸上的人工沙坝在建成后4年内向岸迁移了300 m。我国秦皇岛海岸上的人工沙坝在建成后的3年内也表现出稳定向岸迁移的趋势<sup>[8,51]</sup>。

在时间尺度较短的风暴过程中,人工沙坝的短期演变尤为剧烈,并且对海滩恢复有至关重要的影响<sup>[52-54]</sup>。但受制于极端天气下的观测技术局限,风暴波浪作用下的人工沙坝横向迁移过程往往较难捕捉。Elko 和 Wang<sup>[53]</sup>测量了美国 Upham 海岸上的人工沙坝在飓风“Frances”过境前后的地形变化,发现典型监测断面上的人工沙坝有明显的离岸迁移趋势。荷兰 Egmond 海岸是侵蚀热点,人工沙坝在波浪作用下没有发生明显的迁移,但坝槽形态逐渐消失<sup>[55]</sup>。最近, Li 等<sup>[56-57]</sup>基于物理模型试验,发现向海侧坡度较陡的人工沙坝在大浪作用下可引起局部向岸输沙和人工沙坝向岸迁移现象,有别于风暴条件下海滩剖面离岸输沙和天然沙坝离岸迁移的传统认识。因此,在时间尺度较短的风暴过程中,人工沙坝的地貌响应和剖面演变规律更为复杂,目前尚未达成统一的认识。

## 2.2 人工沙坝剖面形态演变模式

在横向迁移过程中,人工沙坝的剖面形态也在不断变化,其“遮蔽”和“喂养”的能力也随之改变,进而影响干滩宽度和岸滩泥沙收支。因此,研究人工沙坝剖面形态演变模式对于评估其养滩效果具有重要意义。描述人工沙坝剖面形态的主要参数通常包括垂向上的显著程度(坝高和坝顶水深)和横向上的不对称度(两侧坡度的相对大小)。

对已有现场观测和物理模型试验结果的初步总

结分析发现,人工沙坝在垂向显著程度上呈现出两种典型的形态演变模式:(1)“增长”模式。如图 1a 所示,人工沙坝向岸迁移的过程中坝槽形态不断增长。在荷兰 Terschelling 海岸<sup>[49,58]</sup>、美国 Fort Myers 海岸<sup>[48]</sup>、新西兰 Tairua 海岸<sup>[59]</sup>以及近期李元<sup>[60]</sup>开展的波浪水槽试验中都曾观测到这种模式。若波浪作用时间足够长,沙坝最终将填补在岸滩上并拓宽滩肩;(2)“衰减”模式。如图 1b 所示,人工沙坝的坝槽形态逐渐衰减,人工沙坝的泥沙最终将填补在较长范围的深槽中。在前文提及的荷兰 Egmond 海岸以及 Smith 等<sup>[61]</sup>开展的波流港池试验中都曾观测到人工沙坝剖面形态衰减模式。

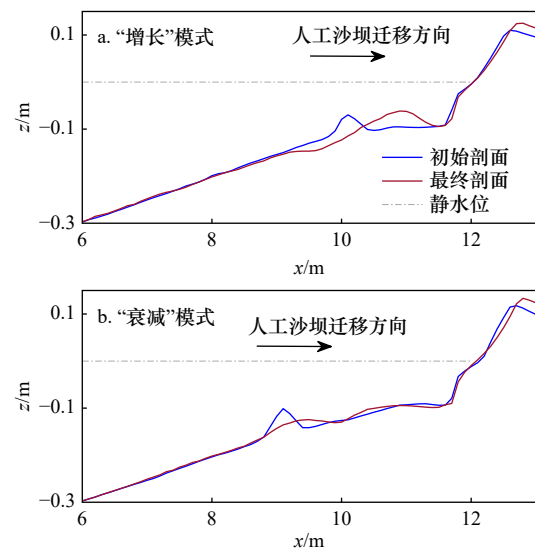


图 1 人工沙坝剖面形态演变模式示意图  
Fig. 1 Schematic of modes for profile evolution of artificial sandbar

数据来源于文献 [60]

Data are obtained from reference [60]

在横向不对称度上, Cheng 和 Wang<sup>[62]</sup>基于佛罗里达中西部海岸的4年观测数据,认为沙坝形态不对称度与沙坝迁移方向有关。例如,当天然沙坝向岸迁移,其向岸侧坡度变陡而向海侧坡度变缓,在向岸方向上不对称度增大,反之则反。然而,这一规律并不总是适用于人工沙坝。拾兵等<sup>[6]</sup>开展的物理模型试验中,梯形人工沙坝的两侧坡度在演变过程中均变缓,沙坝不对称度没有明显变化。马悦等<sup>[63]</sup>的数值模拟结果显示人工沙坝向岸侧坡度变陡,向海侧坡度保持不变。最近, Pan 等<sup>[64]</sup>初步总结了弱动力海滩上规则波作用下人工沙坝形态不对称度与波高、波周期的定性关系,发现大波高、小周期的条件下更容易形成不对称度较大的人工沙坝。

### 2.3 人工沙坝与天然地貌的耦合规律

天然海滩上往往存在沙坝或滩肩等初始地貌形态<sup>[65-72]</sup>。从地貌系统响应的角度看,人工沙坝喂养海滩的过程也是人工沙坝与天然地貌通过水动力互馈和泥沙交换,发生相互作用并重新适应的过程。一方面,人工沙坝和天然沙坝的位置关系影响了人工沙坝两侧的水深变化特征,改变了波流传播历史、输沙路径和地形条件,可能引起人工沙坝与天然沙坝的地貌形态耦合;另一方面,人工沙坝向岸迁移喂养滩肩的过程势必伴随着沙坝泥沙的流失和滩肩泥沙的淤积,且人工沙坝与天然滩肩的初始距离影响该过程的强度和时间周期,随着两者逐渐靠近,滩肩前沿的水动力变化也会反馈到人工沙坝上方的动力条件。

人工沙坝与岸线、天然沙坝及滩肩之间的地貌形态耦合效应在现场观测、物理模型试验与数值模拟研究中多有体现。例如, Hoekstra 等<sup>[73]</sup>发现 Terschelling 海岸在实施人工沙坝养滩后的前 2.5 年里,人工沙坝喂养效果明显,使该海岸的岸线由原先每年后退 3 m 的侵蚀状态转变为每年前进 7 m 的淤积状态。Atkinson 和 Baldock<sup>[74]</sup>发现了在海平面上升的背景下,人工沙坝具有减缓岸线后退的功能。Marinho 等<sup>[75]</sup>建立了经验模型来描述人工沙坝与滩肩之间的泥沙交换。Ojeda 等<sup>[50]</sup>分析了 Noordwijk 双沙坝海岸对人工沙坝养滩的响应,发现人工沙坝降低了天然沙坝离岸迁移的速率。潘毅等<sup>[76]</sup>探讨了人工沙坝对天然沙坝的扰动作用,以及天然沙坝对人工沙坝养滩工程寿命的影响。Li 等<sup>[56, 77]</sup>基于水槽试验,发现人工沙坝会引起滩肩风暴响应的滞后现象,并提出了考虑人工沙坝形态参数的破波相似系数  $\zeta_A$  与表征滩肩形态变化的无量纲参数  $\psi$  之间的定量关系:

$$\psi = A \tanh(B\zeta_A) + C, \quad (1)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均是常数,与可调节的参数  $\alpha$  有关(取值范围为 0~1)。如图 2 所示,当考虑人工沙坝形态参数的破波相似系数  $\zeta_A$  较大时,人工沙坝形态显著,对后方滩肩的“遮蔽效应”较明显。此时,对应的滩肩形态变化参数  $\psi$  较大,说明风暴条件下滩肩的侵蚀较小,甚至出现淤积的现象( $\psi > 1$ )。这些研究表明人工沙坝可以增强海滩的韧性,在大浪条件下通过改变波能耗散在整个海滩剖面上的分布格局,进而影响海滩系统中各个地貌单元的动力条件和剖面演变规律<sup>[60]</sup>。

总而言之,上述研究证实了在合理设计的前提下,近岸人工沙坝能发挥喂养海滩的作用。然而,不同地区人工沙坝的迁移趋势、剖面形态演变和养滩效果却存在较大的差异。这些差异主要与初始海岸

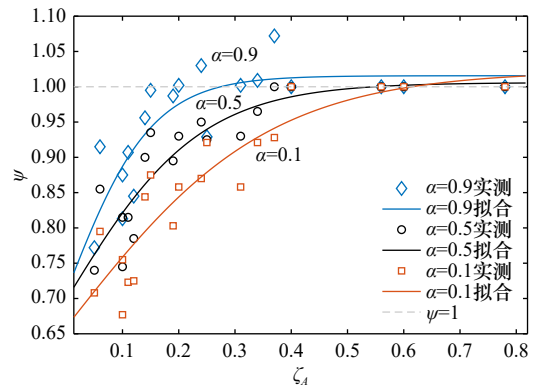


图 2 滩肩形态变化参数  $\psi$  与考虑人工沙坝形态的破波相似参数  $\zeta_A$  的关系(修改自文献[56])

Fig. 2 Relationship between berm shape parameter  $\psi$  and surf similarity parameter considering the morphology of the artificial sandbar  $\zeta_A$  (modified from reference [56])

地形、波浪条件、输沙特性和人工沙坝设计形式等众多因素相关。因此,需要更广泛积累原型海岸观测数据和开展更系统深入的试验研究,以进一步厘清复杂环境下的人工沙坝剖面演变规律。

### 3 人工沙坝平衡剖面形态特征与波能耗散规律

人工沙坝剖面的动态平衡常见于弱动力海岸,在长期波浪作用下沙坝具有较稳定的形态,此类剖面被称为人工沙坝平衡剖面。平衡剖面是波浪、波生流等动力因素与海底地形和泥沙特性在长时间尺度上的非线性耦合互馈的结果。人工沙坝平衡剖面与养滩效果、工程稳定性和工程寿命等问题尤其相关。研究人工沙坝平衡剖面有助于优化养滩工程设计(尤其是补沙位置和补沙粒径的选择),提高养滩工程的效率,降低养滩工程的成本<sup>[78]</sup>。

以往研究致力于使用基于统计学规律的经验性数学表达式或函数曲线描述剖面的几何形态。一些经典的平衡剖面理论,包括 Bruun<sup>[79]</sup>与 Dean<sup>[80]</sup>提出的幂函数剖面, Bodge<sup>[81]</sup>、Lee<sup>[82]</sup>提出的指数函数剖面以及 Dai 等<sup>[83]</sup>在华南砂质海岸上的改进形式,都只适用于没有沙坝的单调剖面形态,因而不适用于描述人工沙坝平衡剖面形态。针对这一局限性, Holman 等<sup>[84]</sup>复合了一个余弦函数形状的沙坝,用以描述沙坝型的海滩平衡剖面。该方法不仅能描述沙坝-坝槽形态,而且能表征沙坝形态的平滑过渡,在人工沙坝平衡剖面的描述与预测中具有较大的应用潜力。Pan 等<sup>[51]</sup>基于北戴河低能砂质海岸观测数据,提出了考虑剖面泥沙粒径差异的复合平衡剖面公式,预测均方根误差仅为 0.14~0.23 m。最近,匡翠萍等<sup>[85]</sup>基于最大信息

熵原理,考虑近岸剖面 and 离岸剖面的差异,采用 3~4 个参数以抛物线形式分段描述沙坝剖面,能较好预测单一沙坝的剖面形态。

平衡剖面的形成与其上方的波能耗散规律具有一定的内在联系。Dean<sup>[80]</sup>提出了平衡剖面上单位水体内波浪破碎能量耗散率为均匀分布的假定,这一假定得到了大量研究的验证<sup>[86-87]</sup>。然而,由于较陡的向海侧坡度和较浅的坝顶水深,人工沙坝上方的强非线性波浪破碎会使能量耗散率在此处出现一个峰值。近期一些研究致力于量化人工沙坝上方的波浪非线性演化<sup>[88]</sup>、波高变化<sup>[18]</sup>和波能耗散率<sup>[89]</sup>。Li 等<sup>[89]</sup>开展了常浪条件下的人工沙坝养滩水槽试验,证实了人工沙坝平衡剖面上的单位水体波能耗散率比初始时刻更为均匀,尤其体现在人工沙坝上方的波能耗散率为初始时刻的 1/6。Pan 等<sup>[51]</sup>也发现在北戴河海滩地形剖面趋于平衡的过程中,波能耗散率趋于均匀。因此,单位水体波能耗散率沿程分布的均匀程度可在一定程度上反映人工沙坝剖面的平衡程度。

然而,波能耗散率的均匀程度缺乏统一的度量标准。通常的做法是计算特定时刻各个波浪测点处的波能耗散率并与理论值比较,判断波能耗散率分布的均匀程度。实测的波能耗散率一般采用 Wang 等<sup>[87]</sup>提出的采用相邻两个浪高仪的实测波能流与中间水深的插值算法。这种做法本质上是采用一段距离内的平均波能耗散率表示某一位置的波能耗散率,所得到的分布均匀程度与实际情况存在偏差。最近, Li 等<sup>[90]</sup>提出了采用“波能熵”无量纲参数来衡量海滩剖面平衡程度的方法,可直接建立海滩剖面响应(冲淤变化)与波浪驱动力(波能耗散率)之间的定量关系,从而简化对复杂水沙过程的描述,具有一定的工程应用前景。

## 4 人工沙坝输沙机制与数值模拟方法

### 4.1 人工沙坝演变过程中的输沙机制

波浪作用下,人工沙坝上方的泥沙输运是一个多时空尺度并存和多动力因素耦合作用下的复杂过程。Grasso 等<sup>[91]</sup>发现大浪条件下,海滩剖面上以离岸输沙为主,主要受底部离岸流驱动,人工沙坝减弱了泥沙从上部滩面离岸输运的强度;在常浪条件下海滩剖面上以向岸输沙为主,主要受波浪非线性驱动,向岸输沙率随人工沙坝上方的波浪近底水质点速度不对称性和加速度不对称性的增大而增大。Atkinson 和 Baldock<sup>[74]</sup>发现水位变化也会对输沙方向造成一定的影响,当海平面上升时,人工沙坝的输沙方向趋于离岸。Li 等<sup>[56]</sup>发现一定形状的人工沙坝可以在大浪条

件下引起局部的向岸输沙,并将此现象归因于卷破波引起的泥沙悬扬事件与波峰时刻的相位耦合作用,这与前人提出的卷破波促进向岸输沙和崩破波促进离岸输沙的观点相吻合<sup>[92-94]</sup>。

由于目前仍较缺乏人工沙坝演变过程中的近底水沙原位观测数据,无法精细分析瞬时输沙率沿水深的变化,常采用地形冲淤数据来反推水深积分的时均输沙率。另一方面,海滩剖面演变数值模型也有助于揭示人工沙坝输沙动力机制和输沙率时空分布特性。Li 等<sup>[89]</sup>在数值模型验证的基础上,借助模拟结果分析了人工沙坝演变过程中推移质输沙率和悬移质输沙率的时空分布特性。发现在常浪条件下,人工沙坝剖面上以推移质输沙为主,输沙率的量值随时间减小,输沙率的最大值出现在人工沙坝上方或者岸线附近,取决于人工沙坝的坝顶水深。随着观测和模拟技术的发展,对近底流速和含沙量垂向结构的精细复演有望进一步厘清人工沙坝演变的临界水沙条件和主导动力机制。

人工沙坝的输沙规律与天然沙坝也具有一定的区别。针对天然沙坝,一般认为沙坝上方波浪破碎引起的底部离岸流是离岸输沙和沙坝离岸迁移的主导动力机制,而沙坝向岸迁移则与近底波浪水质点运动的不对称性、波浪边界层时均余流、斯托克斯漂移以及近底泥沙的层化制紊效应引起的向岸输沙有关<sup>[47]</sup>。与天然沙坝相比,人工沙坝的输沙规律更为复杂,主要体现在两个方面。其一,人工沙坝与当地水动力条件的不匹配程度相较于天然沙坝更大,人工沙坝的输沙过程更为剧烈,特别是风暴作用下会在较短的时间内产生大量的侵蚀。这一特性加大了人工沙坝观测的难度,特别是捕捉人工沙坝建成后的初期演变,对观测仪器的可靠性和观测的时空分辨率提出更高的要求。其二,人工沙坝输沙的主导动力机制更为复杂。原因在于人工沙坝引起的坡度和水深突变会导致波浪破碎特性、波生流强度和波浪水质点的非线性振荡运动发生剧烈变化。Zhang 等<sup>[95]</sup>发现波浪在陡坡上传播时,波浪变形速率加快,波峰面坡度角变陡。与缓坡相比,陡坡上波浪破碎的时空范围更集中,破碎强度更大<sup>[96]</sup>。然而,人工沙坝上方波浪破碎引起的垂向掺混对整个输沙系统的贡献还不清晰。目前的研究仅局限于天然海岸破波带或岸线前方破波区的观测<sup>[97-98]</sup>,而人工沙坝引起的破碎紊动对近底泥沙输运和沙坝迁移的影响研究尚未得到重视。上述人工沙坝地形扰动引起的剧烈输沙过程在初始时刻最明显,随着人工沙坝剖面形态逐渐适应于水动力条

件,人工沙坝逐渐体现出与天然沙坝类似的输沙效应。

#### 4.2 人工沙坝演变的数值模拟方法

近岸沙坝演变数值模型的进步建立在对水沙运动机制的认识不断深入的基础上,从最初的经验模型逐步发展到基于动力过程的数值模型。数值模型侧重于描述海滩剖面演变过程中的内在物理机制,包括波浪传播变形、波生流演化、泥沙运动与地形演变。近年来,相关的数值模型研究致力于改进水沙运动机制描述的完整度和准确度,主要包括:(1)更好地模拟波浪速度不对称性和加速度不对称性对泥沙运动的影响<sup>[99-101]</sup>;(2)更好地刻画非线性波浪和底部离岸流共同作用下的泥沙运动特性<sup>[102-105]</sup>;(3)更好地描述波浪破碎对近底泥沙运动的影响<sup>[106-107]</sup>;(4)更好地模拟变化驱动条件下长时间尺度的岸滩侵蚀与恢复过程<sup>[108-110]</sup>。

根据模型中考虑物理过程的精细程度,可以将数值模型分为波相解析的流体力学模型和波相平均模型。波相解析的流体力学模型通常求解纳维-斯托克斯方程或其简化形式,精细描述物理量在一个波周期内的变化过程。Jacobsen和Fredsoe<sup>[111]</sup>采用基于有限体积法的自由波面追踪法,较好地模拟了波浪在人工沙坝上方传播时的波面和波高变化趋势。Pourzangbar和Brocchini<sup>[112]</sup>采用耦合非线性浅水方程的海滩剖面演变数值模型准确复演了沙坝生成、迁移和岸线后退过程。最近,Marchesiello等<sup>[113]</sup>在三维波相解析模型中使用弱可压缩假定和地形演变加速技术提高了模型计算效率,成功模拟了沙坝向岸迁移与风暴后岸滩恢复过程。此类波相解析数值模型侧重于描述精细和完整的物理过程,但是计算耗时很长,因而更适用于模拟短期的沙坝演变过程。

基于波相平均的海滩剖面演变数值模型通常采用波能守恒方程或波作用量守恒方程描述波浪传播变形,采用泥沙对流扩散方程模拟悬移质输沙,采用参数化公式来简化计算波浪破碎和推移质输沙等部分复杂的物理过程。波相平均模型计算方便,考虑了物理过程完整性和工程适用性的折衷,因而常被应用于实际工程中人工沙坝剖面形态演变的模拟<sup>[58-59]</sup>和不同人工沙坝填沙方案的养滩效果评估<sup>[13,63,114]</sup>。匡翠萍等<sup>[115]</sup>采用Delft3D模型模拟分析了北戴河中海滩浴场水下人工沙坝引起的水动力环境变化。范文彰<sup>[116]</sup>采用XBeach模型模拟分析了潍坊人工沙滩的冲淤演变规律,探讨了风暴群、人工取砂和人工沙坝等因素的影响。李元<sup>[60]</sup>应用CROSPE海滩剖面演变数值模型复演了人工沙坝“增长型”和“衰减型”演变模式,揭

示了底部离岸流增强人工沙坝向岸侧的总输沙率变化梯度,是控制人工沙坝形态稳定性的重要机制。然而,波相平均模型在模拟人工沙坝演变中还存在两个难题。其一是模型无法描述人工沙坝上方波浪破碎紊动的垂向掺混与波浪相位之间的关系,从而导致对大浪条件下人工沙坝上方卷破波引起的向岸净输沙率的计算出现偏差<sup>[56]</sup>。其二是由于冲泻区内水沙运动机制较为复杂<sup>[117-119]</sup>,此类模型尚无法考虑周期性淹没/露出的冲泻区波流动力对泥沙运动的影响,采用经验公式计算冲泻区内的输沙率也无法精确描述冲泻区与人工沙坝的泥沙交换和人工沙坝喂养滩肩的过程。

## 5 结论与展望

近岸人工沙坝的剖面演变规律和泥沙输运机制研究不仅是海岸工程学科的前沿研究热点,对于进一步加强海岸带保护修复工程的基础理论和关键技术创新也具有重要意义。近年来,这方面的国内外研究取得了较大的进展,在不同动力条件下的人工沙坝横向迁移规律、水沙运动机制、形态演变模式及其与滩肩等天然地貌的耦合规律等方面得到了一些新的认识,建立了人工沙坝平衡剖面形态的描述方法和平衡程度的衡量方法,发展了海滩剖面演变数值模型进一步提升了人工沙坝演变特性和养滩效果的模拟评估能力。针对该研究方向中尚未解决的一些关键问题,今后的研究重点包括以下几个方面:

(1)极端动力条件下人工沙坝地貌响应规律的深化研究。开展更多的现场观测和室内试验,弥补人工沙坝上方近底水沙结构数据的不足,进一步深入研究大浪与风暴潮耦合作用下的人工沙坝演变过程,厘清极端动力条件下的人工沙坝演变规律及其在不同海岸地区中的差异性成因。

(2)人工沙坝演变模拟预测方法的进一步改进。在现有的数值模型中考虑人工沙坝上方破波紊动的垂向掺混与波浪相位之间的关系,完善冲泻区水沙运动过程和人工沙坝-滩肩泥沙交换的定量表征,综合提升人工沙坝演变及其与天然地貌耦合过程模拟的精细度、准确度和效率。

(3)人工沙坝养滩工程的效果评估与优化设计。面向实际工程应用,定量分析不同海岸类型、初始地形、动力环境、泥沙特性和人工沙坝设计形式下的人工沙坝“遮蔽效应”与“喂养效应”,评估不同环境下的人工沙坝养滩效果及其主控因子,探讨人工沙坝参数的优化设计方法。

## 参考文献:

- [1] 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 海岸整治修复国内外研究进展与展望[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 635–640.  
Zhang Minghui, Sun Zhaochen, Liang Shuxiu, et al. Progress of coastal environment repairing and cleaning engineering research and its prospect[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(4): 635–640.
- [2] 赵多苍, 拾兵. 近岸人工沙坝养滩工程技术研究进展[C]//第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会(下册). 北京: 海洋出版社, 2013: 147–150.  
Zhao Duocang, Shi Bing. Reseach progress of engineering technology for beach nourishment using nearshore artificial sandbar[C]//Proceedings of the 16th China Ocean (Coastal) Engineering Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2013: 147–150.
- [3] 朱金龙, 拾兵, 殷云珠, 等. 近岸人工沙坝对岸滩养护效果的研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(5): 100–106.  
Zhu Jinlong, Shi Bing, Yin Yunzhu, et al. Study on the protective effect of off-shore artificial sandbank to beach[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(5): 100–106.
- [4] 庄振业, 曹立华, 李兵, 等. 我国海滩养护现状[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(3): 133–139.  
Zhuang Zhenye, Cao Lihua, Li Bing, et al. An overview of beach nourishment in China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(3): 133–139.
- [5] 戚洪帅, 刘根, 蔡锋, 等. 海滩修复养护技术发展趋势与前景[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(1): 111–125.  
Qi Hongshuai, Liu Gen, Cai Feng, et al. Development trend and prospect of beach nourishment technology[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(1): 111–125.
- [6] 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, 2018, 48(1): 104–110.  
Shi Bing, Yu Dong, Zhao Eenjin, 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.
- [7] 杨燕雄, 杨雯, 邱若峰, 等. 人工近岸沙坝在海滩养护中的应用——以北戴河养滩工程为例[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 23–30.  
Yang Yanxiong, Yang Wen, Qiu Ruofeng, et al. Application of artificial submerged sandbars to beach nourishment—A case from Beidaihe beach[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 23–30.
- [8] 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 Yubao, Pan Yi, Chen Yongping, 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.
- [9] 赵多苍. 沙质海滩侵蚀与近岸人工沙坝防护技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
Zhao Duocang. Study on the sandy beach erosion and protection technology of the offshore artificial sand bar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [10] Kuang Cuiping, Han Xuejian, Zhang Jiabo, 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.
- [11] Kuang Cuiping, Ma Yue, Han Xuejian, et al. Experimental observation on beach evolution process with presence of artificial submerged sand bar and reef[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(12): 1019.
- [12] Kuang Cuiping, Mao Xiaodan, Gu Jie, 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.
- [13] Spielmann K, Certain R, Astruc D, et al. Analysis of submerged bar nourishment strategies in a wave-dominated environment using a 2DV process-based model[J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(8): 767–778.
- [14] 马悦. 基于人工沙坝的滨面养滩工程模拟研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
Ma Yue. Simulation studies on shoreface beach nourishment based on the artificial sandbar[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [15] 吴建, 拾兵, 李智, 等. 近岸人工沙坝保滩促淤的试验研究[J]. 海洋通报, 2012, 31(2): 176–180.  
Wu Jian, Shi Bing, Li Zhi, et al. Experimental study on the shore nourishment for beach protection and siltation promotion[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(2): 176–180.
- [16] 匡翠萍, 董智超, 顾杰, 等. 岬湾海岸海滩养护工程对水体交换的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(6): 769–777.  
Kuang Cuiping, Dong Zhichao, Gu Jie, et al. Influence of beach nourishment project on water exchange in headland-bay coast[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(6): 769–777.
- [17] 匡翠萍, 潘毅, 张宇, 等. 北戴河中直六、九浴场养滩工程效果分析与预测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 509–514.  
Kuang Cuiping, Pan Yi, Zhang Yu, et al. Performance analysis and prediction of beach nourishment project in Zhongzhi 6th and 9th bathing places in Beidaihe[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(4): 509–514.
- [18] 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 Duocang, Bai Yuchuan, Shi Bing. Study on the properties of weakening wave and beach nourishment by artificial sand bar[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(2): 100–106.
- [19] 赵多苍, 拾兵, 宋朋远, 等. 极限波高下人工沙坝的动力调整研究[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(6): 97–102.  
Zhao Duocang, Shi Bing, Song Pengyuan, et al. Study of artificial sand bar dynamic adjustment on limit wave height[J]. Periodical of

- Ocean University of China, 2014, 44(6): 97–102.
- [20] 刘焕文. 沙坝及人工沙坝引起海洋表面波Bragg共振反射的研究进展[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(5): 459–471.  
Liu Huanwen. Advances in research on bragg resonance of ocean surface waves by sandbars and artificial sandbars[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(5): 459–471.
- [21] 曹坤, 拾兵, 赵多苍, 等. 人工沙坝喂养侵蚀海滩效果研究[J]. 海洋湖沼通报, 2015(4): 127–131.  
Cao Kun, Shi Bing, Zhao Duocang, et al. Study of the effect of the artificial sandbank on the eroded beach nourishment[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2015(4): 127–131.
- [22] 梁丙臣, 朱梅溪, 屈智鹏, 等. 不同补沙方案对海滩剖面影响的数值模拟对比分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(11): 136–145.  
Liang Bingchen, Zhu Meixi, Qu Zhipeng, et al. Comparative analysis on numerical simulation of the impacts of different beach nourishment schemes on beach profile[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(11): 136–145.
- [23] 蔡钰. 人工沙坝平衡剖面形态特征与水沙特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2021.  
Cai Yu. Study on the morphological features and water-sediment characteristics of artificial sandbar equilibrium profile[D]. Nanjing: Hohai University, 2021.
- [24] 张弛. 沙质海岸横向泥沙输运动力机制与数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2010.  
Zhang Chi. Cross-shore sediment transport on sandy beach: physical mechanism and numerical simulation[D]. Nanjing: Hohai University, 2010.
- [25] 张弛, 王义刚, 郑金海. 波生流垂向结构研究综述[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 739–746.  
Zhang Chi, Wang Yigang, Zheng Jinhai. Review of the vertical structure of wave-induced currents[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 739–746.
- [26] 张弛, 郑金海, 王义刚. 波浪作用下沙坝剖面形成过程的数值模拟[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 104–109.  
Zhang Chi, Zheng Jinhai, Wang Yigang. Numerical simulation of wave-induced sandbar formation[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 104–109.
- [27] 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 Yanxiong, Zhang Jiabo, Liu Songtao. What we have learnt from the beach nourishment project in Qinhuangdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(3): 1–15.
- [28] 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 Yanxiong, Qiu Ruofeng, Zou Zhili, et al. Experimental study on nourishment of Beidaihe beach[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(4): 18–23.
- [29] 王刚, 张甲波, 邱若峰, 等. 秦皇岛洋河—葡萄岛夷平砂质海岸人工养滩效果[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(6): 28–36.  
Wang Gang, Zhang Jiabo, Qiu Ruofeng, et al. Effectiveness of artificial beach nourishment to protection of the straight sandy coast around Yanghe-Grape Island at Qinhuangdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(6): 28–36.
- [30] 孙波, 孙林云, 陈雄波. 人工育滩的近岸补沙方法[C]//第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 2005: 517–520.  
Sun Bo, Sun Linyun, Chen Xiongbo. Methods of shoreface nourishment for beach nourishment[C]//Proceedings of the 12nd China Ocean (Coastal) Engineering Symposium. Beijing: China Ocean Press, 2005: 517–520.
- [31] 邱若峰, 庄振业, 赵友鹏, 等. 海滩养护的功效和寿命——以北戴河海滩养护工程为例[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(3): 26–33.  
Qiu Ruofeng, Zhuang Zhenye, Zhao Youpeng, et al. Beidaihe beach nourishment: a case study of beach nourishment project in Beidaihe[J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(3): 26–33.
- [32] 邱若峰, 邢容容, 刘修锦, 等. 唐山市海岛沙滩受损海岸整治修复方案探讨[J]. 海洋开发与管理, 2019, 36(5): 41–47.  
Qiu Ruofeng, Xing Rongrong, Liu Xiujin, et al. Analysis of restoration idea for damaged coast in island beach of Tangshan[J]. Ocean Development and Management, 2019, 36(5): 41–47.
- [33] 徐伟, 陈淳, 刘建辉, 等. 海堤生态化建设适宜性评价研究及应用[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(4): 659–668.  
Xu Wei, Chen Chun, Liu Jianhui, et al. Study and application of the assessment on ecological seawall construction suitability[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(4): 659–668.
- [34] 马琛, 余静, 胡超, 等. 日照万平口沙滩质量评价及“蓝旗沙滩”建设建议[J]. 海洋开发与管理, 2021, 38(9): 88–94.  
Ma Chen, Yu Jing, Hu Chao, et al. Beach quality rating and suggestions on construction of blue flag of wanpingkou beach of Rizhao[J]. Ocean Development and Management, 2021, 38(9): 88–94.
- [35] 刘针, 程永舟, 戈龙仔, 等. 三亚新机场工程海岸侵蚀补沙措施效果研究[J]. 海岸工程, 2021, 40(2): 121–130.  
Liu Zhen, Cheng Yongzhou, Ge Longzai, et al. Study on the effect of sand compensation measures for coastal erosion of Sanya new airport project[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(2): 121–130.
- [36] 李平, 丰爱平, 孙惠凤, 等. 海岸侵蚀灾害调查和评价研究进展与展望[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 55–63.  
Li Ping, Feng Aiping, Sun Huifeng, et al. Research progress and prospect of coastal erosion investigation and evaluation[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(4): 55–63.
- [37] 季小梅, 张永战, 朱大奎. 三亚海岸演变与人工海滩设计研究[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 853–860.  
Ji Xiaomei, Zhang Yongzhan, Zhu Dakui. Evolution of Sanya coast and artificial beach design[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5):

- 853–860.
- [38] 顾杰, 宋竣霖, 王佳元, 等. 近海人工岛及沙坝工程与潮流的响应特征研究[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2017, 32(2): 182–188.  
Gu Jie, Song Honglin, Wang Jiayuan, et al. Study on responses of tidal currents to artificial island and sandbars in coastal waters[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2017, 32(2): 182–188.
- [39] 蔡锋, 雷刚, 苏贤泽, 等. 台风“艾利”对福建沙质海滩影响过程研究[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 98–109.  
Cai Feng, Lei Gang, Su Xianze, et al. Study on process response of Fujian beach geomorphology to typhoon Aere[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1): 98–109.
- [40] 张甲波, 杜立新. 人工养滩工程的综合防护原则及设计方法[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(2): 10–16.  
Zhang Jiabo, Du Lixin. Design and integrated protection principles of beach nourishment projects[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(2): 10–16.
- [41] 刘建辉, 蔡锋. 福建旅游沙滩现状及开发前景[J]. 海洋开发与管理, 2009, 26(11): 78–83.  
Liu Jianhui, Cai Feng. Status and development prospects of Fujian tourism beaches[J]. Ocean Development and Management, 2009, 26(11): 78–83.
- [42] 匡翠萍, 单云驰, 顾杰, 等. 海坛湾龙凤头海滩养护工程方案[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 714–721.  
Kuang Cuiping, Shan Yunchi, Gu Jie, et al. Beach nourishment in Longfengtou beach of Haitan Bay[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(5): 714–721.
- [43] 朱磊, 杨燕雄, 杨雯, 等. 工程养护海滩对“803”风暴潮的响应过程研究[J]. 海洋通报, 2019, 38(1): 102–114.  
Zhu Lei, Yang Yanxiong, Yang Wen, et al. Study on the response process of nourished beach to “803” storm surge[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(1): 102–114.
- [44] 张明慧, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 砂质海岸整治修复效果模糊综合评价研究——以营口月亮湾为例[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 698–706.  
Zhang Minghui, Sun Zhaochen, Liang Shuxiu, et al. A study on fuzzy comprehensive evaluation for sandy coast repairing effect: a case in the Moon Bay of Yingkou[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 698–706.
- [45] 张明慧. 砂质海岸带整治修复工程效果评价方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Zhang Minghui. Evaluation methods for rectification and repairing engineering in sandy coastal zone[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [46] 张洪艳. 植被与人工沙坝对砂质海岸剖面演化影响的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.  
Zhang Hongyan. Study on the influence of vegetation and artificial sand bar on the evolution of sandy beach profile[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [47] 胡日军, 吴建政, Ping D, 等. 海岸沙坝横向迁移研究综述[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 784–791.  
Hu Rijun, Wu Jianzheng, Ping D, et al. A review of cross-shore migration of nearshore sandbar[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 784–791.
- [48] Brutsché K E, Wang Ping, Beck T M, et al. Morphological evolution of a submerged artificial nearshore berm along a low-wave microtidal coast, Fort Myers Beach, west-central Florida, USA[J]. Coastal Engineering, 2014, 91: 29–44.
- [49] Grunnet N M, Ruessink B G. Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment[J]. Coastal Engineering, 2005, 52(2): 119–137.
- [50] Ojeda E, Ruessink B G, Guillen J. Morphodynamic response of a two-barred beach to a shoreface nourishment[J]. Coastal Engineering, 2008, 55(12): 1185–1196.
- [51] Pan Yi, Kuang Cuiping, Zhang Jiabo, 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.
- [52] de Schipper M A, Ludka B C, Raubenheimer B, et al. Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 2(1): 70–84.
- [53] Elko N A, Wang Ping. Immediate profile and planform evolution of a beach nourishment project with hurricane influences[J]. Coastal Engineering, 2007, 54(1): 49–66.
- [54] Guo Junli, Shi Lianqiang, Pan Shunqi, et al. Monitoring and evaluation of sand nourishments on an embayed beach exposed to frequent storms in eastern China[J]. Ocean & Coastal Management, 2020, 195: 105284.
- [55] 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.
- [56] Li Yuan, Zhang Chi, Dai Weiqi, et al. Laboratory investigation on morphology response of submerged artificial sandbar and its impact on beach evolution under storm wave condition[J]. Marine Geology, 2022, 443: 106668.
- [57] Li Yuan, Zhang Chi, Cai Yu, et al. Experimental observation of artificial sandbar response to large waves[M]//Wang Ping, Rosati J D, Vallee M. Coastal Sediments 2019. Singapore: World Scientific, 2019: 347–355.
- [58] Grunnet N M, Walstra D J R, Ruessink B G. Process-based modelling of a shoreface nourishment[J]. Coastal Engineering, 2004, 51(7): 581–607.
- [59] van Maanen B, de Ruiter P J, Coco G, et al. Onshore sandbar migration at Tairua Beach (New Zealand): numerical simulations and field

- measurements[J]. *Marine Geology*, 2008, 253(3/4): 99–106.
- [60] 李元. 近岸人工沙坝剖面形态演变规律及其水沙运动机制研究[D]. 南京: 河海大学, 2021.  
Li Yuan. Morphology evolution and its underlying hydrodynamic and sediment transport mechanisms of nearshore artificial sandbar[D]. Nanjing: Hohai University, 2021.
- [61] Smith E R, Mohr M C, Chader S A. Laboratory experiments on beach change due to nearshore mound placement[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 121: 119–128.
- [62] Cheng Jun, Wang Ping. Dynamic equilibrium of sandbar position and height along a low wave energy micro-tidal coast[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 165: 120–136.
- [63] 马悦, 拾兵, 杨燕雄, 等. 近海人工沙坝护岸养滩的模拟方法[J]. *海洋地质前沿*, 2013, 29(2): 31–36.  
Ma Yue, Shi Bing, Yang Yanxiong, et al. Simulation methods for artificial nearshore sanbars for costal protection and beach nourishment[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2013, 29(2): 31–36.
- [64] Pan Yi, Yin S, Chen Yongping, et al. An experimental study on the evolution of a submerged berm under the effects of regular waves in low-energy conditions[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 176: 104169.
- [65] 张尧, 刘旭楠, 刘强, 等. 华南休闲海滩沙坝触发的裂流风险及特征研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(9): 9–21.  
Zhang Yao, Liu Xunan, Liu Qiang, et al. Study on the risk and characteristics of rip currents over sandbars at South China's recreational beaches[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(9): 9–21.
- [66] 张洋, 邹志利, 苟大苟, 等. 海岸沙坝剖面 and 滩肩剖面特征研究[J]. *海洋学报*, 2015, 37(1): 147–157.  
Zhang Yang, Zou Zhili, Gou Daxun, et al. Experiment study on evolution and geometrical characteristics of sandbar profile and berm profile[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 147–157.
- [67] 尹晶, 邹志利, 李松. 波浪作用下沙坝不稳定性实验研究[J]. *海洋工程*, 2008, 26(1): 40–50.  
Yin Jing, Zou Zhili, Li Song. Unstable sandbar movement under wave action[J]. *The Ocean Engineering*, 2008, 26(1): 40–50.
- [68] 尹晶. 海岸沙坝运动的实验与数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
Yin Jing. Experimental and numerical researches of sandbar migration[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [69] 解鸣晓, 李珊, 张弛, 等. 沙质海岸破波带内底部离岸流及沙坝迁移数值模拟研究[J]. *水道港口*, 2016, 37(4): 349–355.  
Xie Mingxiao, Li Shan, Zhang Chi, et al. Numerical modeling of the undertow and sandbar migration process in the surfzone[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, 37(4): 349–355.
- [70] 蒋昌波, 陈杰, 程永舟, 等. 海啸波作用下泥沙运动——I. 岸滩剖面变化分析[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 665–672.  
Jiang Changbo, Chen Jie, Cheng Yongzhou, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: I: beach profile evolution[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 665–672.
- [71] 顾振华, 张弛, 郑金海. 波浪入射条件对双沙坝海岸演变的影响[J]. *泥沙研究*, 2014(6): 68–72.  
Gu Zhenhua, Zhang Chi, Zheng Jinhai. Influence of incident wave condition on evolution of nearshore double sandbar system[J]. *Journal of Sediment Research*, 2014(6): 68–72.
- [72] 程永舟, 潘昀, 蒋昌波, 等. 破碎波作用下沙质海床床面形态变化试验[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 253–259.  
Cheng Yongzhou, Pan Yun, Jiang Changbo, et al. An experimental study on profile changes of sandy seabed under breaking waves[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 253–259.
- [73] Hoekstra P, Houwman K T, Kroon A, et al. Morphological development of the terschelling shoreface nourishment in response to hydrodynamic and sediment transport processes[M]//Edge B L. *Coastal Engineering 1996*. Virginia USA: American Society of Civil Engineers, 1997: 2897–2910.
- [74] Atkinson A L, Baldock T E. Laboratory investigation of nourishment options to mitigate sea level rise induced erosion[J]. *Coastal Engineering*, 2020, 161: 103769.
- [75] 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.
- [76] 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 Yi, Xue Shilei, Wang Xueying, et al. A review of studies on submerged berms[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(9): 1295–1302.
- [77] Li Yuan, Zhang Chi. Morphological hysteresis of artificial beach under large wave condition: an experimental investigation[J]. *Coastal Engineering Proceedings*, 2020(36v): sediment.33.
- [78] Capobianco M, Hanson H, Larson M, et al. Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts[J]. *Coastal Engineering*, 2002, 47(2): 113–135.
- [79] Bruun P. *Coast erosion and the development of beach profiles*[R]. Mississippi: U. S. Army Engineering Waterways Experiment Station, 1954.
- [80] Dean R G. *Equilibrium beach profiles: U. S. atlantic and gulf coasts*[R]. Newark: University of Delaware, 1977.
- [81] Bodge K R. Representing equilibrium beach profiles with an exponential expression[J]. *Journal of Coastal Research*, 1992, 8(1): 47–55.
- [82] Lee P Z F. The submarine equilibrium profile: a physical model[J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(1): 1–17.
- [83] Dai Zhijun, Du Jinzhou, Li Chunchu, et al. The configuration of equilibrium beach profile in South China[J]. *Geomorphology*, 2007,

- 86(3/4): 441–454.
- [84] Holman R A, Lalejini D M, Edwards K, et al. A parametric model for barred equilibrium beach profiles[J]. *Coastal Engineering*, 2014, 90: 85–94.
- [85] 匡翠萍, 黄光玮, 冒小丹, 等. 单一沙坝型海滩平衡剖面形态预测公式[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 555–561.  
Kuang Cuiping, Huang Guangwei, Mao Xiaodan, et al. Empirical equilibrium beach profile formula of sandy beach with a single sandbar[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(4): 555–561.
- [86] Wang Ping, Kraus N C. Beach profile equilibrium and patterns of wave decay and energy dissipation across the surf zone elucidated in a large-scale laboratory experiment[J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(3): 522–534.
- [87] Wang Ping, Ebersole B A, Smith E R. Beach-profile evolution under spilling and plunging breakers[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2003, 129(1): 41–46.
- [88] Li Yuan, Zhang Chi, Chen Shubin, et al. Influence of artificial sandbar on nonlinear wave transformation: experimental investigation and parameterizations[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111540.
- [89] Li Yuan, Zhang Chi, Cai Yu, et al. Wave dissipation and sediment transport patterns during shoreface nourishment towards equilibrium[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(5): 535.
- [90] Li Yuan, Zhang Chi, Chen Dake, et al. Barred beach profile equilibrium investigated with a process-based numerical model[J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 222: 104432.
- [91] 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.
- [92] Ting F C K, Kirby J T. Dynamics of surf-zone turbulence in a spilling breaker[J]. *Coastal Engineering*, 1996, 27(3/4): 131–160.
- [93] Ting F C K, Kirby J T. Dynamics of surf-zone turbulence in a strong plunging breaker[J]. *Coastal Engineering*, 1995, 24(3/4): 177–204.
- [94] Lin Pengzhi, Liu P L F. Turbulence transport, vorticity dynamics, and solute mixing under plunging breaking waves in surf zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C8): 15677–15694.
- [95] Zhang Chi, Zhang Qingyang, Zheng Jinhai, et al. Parameterization of nearshore wave front slope[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 127: 80–87.
- [96] Zhang Chi, Li Yuan, Cai Yu, et al. Parameterization of nearshore wave breaker index[J]. *Coastal Engineering*, 2021, 168: 103914.
- [97] Baldock T E, Holmes P, Bunker S, et al. Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone[J]. *Coastal Engineering*, 1998, 34(3/4): 173–196.
- [98] Brinkkemper J A, Aagaard T, de Bakker A T M, et al. Shortwave sand transport in the shallow surf zone[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2018, 123(5): 1145–1159.
- [99] Fernández-Mora A, Calvete D, Falqués A, et al. Onshore sandbar migration in the surf zone: new insights into the wave-induced sediment transport mechanisms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(8): 2869–2877.
- [100] Hoefel F, Elgar S. Wave-induced sediment transport and sandbar migration[J]. *Science*, 2003, 299(5614): 1885–1887.
- [101] 蔡锋, 刘根. 我国海滩养护修复的发展与技术创新[J]. *应用海洋学学报*, 2019, 38(4): 452–463.  
Cai Feng, Liu Gen. Beach nourishment development and technological innovations in China: an overview[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, 38(4): 452–463.
- [102] Zhang Chi, Zheng Jinhai, Wang Yigang, et al. A process-based model for sediment transport under various wave and current conditions[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(4): 498–512.
- [103] Zhang Chi, Zheng Jinhai, Zhang Jisheng. Predictability of wave-induced net sediment transport using the conventional 1DV RANS diffusion model[J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34(4): 353–364.
- [104] Zhang Chi, Zheng Jinhai, Wang Yigang, et al. Modeling wave-current bottom boundary layers beneath shoaling and breaking waves[J]. *Geo-Marine Letters*, 2011, 31(3): 189–201.
- [105] Zheng Jinhai, Zhang Chi, Demirbilek Z, et al. Numerical study of sandbar migration under wave-undertow interaction[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 140(2): 146–159.
- [106] van der Zanden J, van der A D A, Hurther D, et al. Suspended sediment transport around a large-scale laboratory breaker bar[J]. *Coastal Engineering*, 2017, 125: 51–69.
- [107] Lim G, Jayaratne R, Shibayama T. Suspended sand concentration models under breaking waves: evaluation of new and existing formulations[J]. *Marine Geology*, 2020, 426: 106197.
- [108] 郭俊丽, 时连强, 童宵岭, 等. 浙江朱家尖岛东沙海滩对热带风暴“娜基莉”的响应及风暴后的恢复[J]. *海洋学报*, 2018, 40(9): 137–147.  
Guo Junli, Shi Lianqiang, Tong Xiaoling, et al. The response to tropical storm Nakri and the restoration of Dongsha Beach in Zhujiajian Island, Zhejiang Province[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(9): 137–147.
- [109] 蒋昌波, 伍志元, 陈杰, 等. 风暴潮作用下泥沙运动和岸滩演变研究综述[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 11(1): 1–9.  
Jiang Changbo, Wu Zhiyuan, Chen Jie, et al. Review of sediment transport and beach profile changes under storm surge[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2014, 11(1): 1–9.
- [110] Fellowes T E, Vila-Concejo A, Gallop S L, et al. Decadal shoreline erosion and recovery of beaches in modified and natural estuaries[J].

- Geomorphology*, 2021, 390: 107884.
- [111] Jacobsen N G, Fredsoe J. Cross-shore redistribution of nourished sand near a breaker bar[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2014, 140(2): 125–134.
- [112] Pourzangbar A, Brocchini M. A new process-based, wave-resolving, 2DH circulation model for the evolution of natural sand bars: the role of nearbed dynamics and suspended sediment transport[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 177: 104192.
- [113] Marchesiello P, Chauchat J, Shafiei H, et al. 3D wave-resolving simulation of sandbar migration[J]. *Ocean Modelling*, 2022, 180: 102127.
- [114] 陈雅莉. 非均匀沙海滩剖面演变数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2015.  
Chen Yali. Numerical study on non-uniform sandy beach profile evolution[D]. Nanjing: Hohai University, 2015.
- [115] 匡翠萍, 马悦, 董博灵, 等. 人工水下沙坝对中海滩浴场水动力影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(5): 613–619.  
Kuang Cuiping, Ma Yue, Dong Boling, et al. Effect of artificial submerged sandbar on hydrodynamics at Zhonghaitan beach[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(5): 613–619.
- [116] 范文彰. 风暴作用下人工沙滩侵蚀机制的数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2018.  
Fan Wenzhang. Numerical study on the nourished beach erosion mechanism under storm impacts[D]. Nanjing: Hohai University, 2018.
- [117] Zhu Fangfang, Dodd N. The morphodynamics of a swash event on an erodible beach[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 762: 110–140.
- [118] Zhu Fangfang, Dodd N. Swash zone morphodynamic modelling including sediment entrained by bore-generated turbulence[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 146: 103756.
- [119] Zhu Fangfang, Dodd N, Briganti R, et al. A logarithmic bottom boundary layer model for the unsteady and non-uniform swash flow[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 172: 104048.

## Review on morphological evolution of nearshore artificial sandbar and underlying sediment transport mechanisms

Li Yuan<sup>1,2</sup>, Zhang Chi<sup>1,2</sup>

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 2. *College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China*)

**Abstract:** Implementation of the artificial sandbar is a typical measure for the beach nourishment. Research on the morphological evolution of the artificial sandbar meets the important need for coastal protection and restoration. Domestic and international research on morphological evolution of nearshore artificial sandbar and underlying sediment transport mechanisms are summarized in this paper, focusing on the theoretical aspects, e.g. cross-shore migration, morphology evolution, morphology coupling and mechanisms of sediment transport of the artificial sandbar. In the methodology perspective, the description of the equilibrium profile and numerical modelling of morphology evolution of the artificial sandbar are also highlighted. It is also proposed that future research should focus on the deepening of mechanisms of key processes, the improvement of simulation and prediction methods and the application of practical beach nourishment projects.

**Key words:** beach nourishment; nearshore artificial sandbar; beach profile evolution; coastal sediment transport