

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.05.016

海岸沙坝横向迁移研究综述

胡日军^{1,2}, 吴建政^{1,2}, PING Dong^{1,3}, 马芳⁴, 朱龙海^{1,2}

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. School of Science and Engineering, University of Dundee, Scotland Dundee DD1 4HN;
4. 国家海洋局北海分局北海监测中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 沙坝是波浪作用下砂质海岸地貌的主要表现形态之一, 对于海滩的动力稳定状态具有重要的指示意义。从沙坝的形态参数、沙坝形成理论、沙坝迁移的动力机制以及数值模拟方法等方面概述了水下沙坝横向迁移的研究进展和存在的不足。虽然国内外学者对沙坝横向迁移进行了大量研究, 然而由于海滩复杂的动力过程以及沙坝迁移与泥沙运输之间的耦合作用, 目前仍存在许多问题尚待解决, 未来进一步研究的方向主要包括沙坝迁移过程的空间差异、沙坝迁移的临界条件、波浪破碎对近底泥沙运动和沙坝迁移的影响、数学模型的改进以及沙坝迁移与泥沙运输的耦合机制等方面。

关键词: 水下沙坝; 形态参数; 沙坝迁移; 动力机制; 数值模拟

中图分类号: TV122; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2016)05-0784-08

在波浪作用下弱潮到中潮为主的砂质海岸常会发育水下沙坝^[1], 这些沙坝的存在会使波浪在离岸较远的地方破碎, 具有保护海岸的作用^[2]。作为海岸泥沙运动的重要表现形态^[3], 水下沙坝的位置和形态变化将会影响海滩泥沙运输、岸线变化和海滩形态^[4], 对于认识海滩长期的动力稳定状态具有重要的指示意义。然而, 由于受到海滩剖面测量数据不完整和原位测量手段较少的限制^[5], 同时, 由于海滩水动力、泥沙运输以及沙坝迁移的耦合作用^[6-7], 目前对于水下沙坝横向迁移的演化过程、动力机制等方面仍存在较多的争论^[8-10]。因此, 本文主要从沙坝的形态参数、沙坝形成理论、沙坝迁移的动力机制以及数值模拟方法等方面对水下沙坝横向迁移的研究进展进行综述, 并着重分析目前的研究现状、存在问题以及研究展望。

1 沙坝形态参数

由于沙坝本身具有二维和三维空间上的多变性, 不同位置、不同形态下的沙坝对水动力的响应特征也各不相同, 其迁移速率和迁移过程存在较大差异^[11], 因此, 了解沙坝形态是探讨沙坝迁移的基础^[5]。沙坝形态多变, 根据其沿岸方向的形态特征, 可将沙坝形态概括为3种: 线性沙坝、韵律形态沙坝和非韵律形态沙坝。在不同能量下, 沙坝形态会发生改变, 在高能量(如风暴)作用下沙坝呈近似线性展布, 而在低能量(一般风浪或者涌浪)作用下, 沙坝则变成韵律形态^[12], 其形态变化也可以指示沙坝形成时的波浪方向^[13]。

沙坝的横向形态参数见图1, 其中, U、S、E、C、D和 β 分别为上部侵蚀点、初始海滩剖面点、平衡点(初始沙坝点)、沙坝坝顶、最终沙坝点(闭合点)和初始剖面与水平线角度($\tan \beta = m$); X_{bc} 为沙坝坝顶和原始岸线间的水平距离; h_{bc} 为沙坝坝顶与静水位的垂直距离; X_{be} 为初始沙坝点与原始岸线的水平距离; h_{be} 为初始沙坝点与静水位的垂直距离; X_{bd} 为最终沙坝点与原始岸线间的水平距离; h_{bd} 为最终沙坝点与静水位的

收稿日期: 2016-04-22; 网络出版时间: 2016-08-31

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20160831.1745.032.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479182; 41106039)

作者简介: 胡日军(1980—), 男, 山东胶州人, 讲师, 博士, 主要从事海洋沉积动力研究。E-mail: hrj@ouc.edu.cn

垂向距离; V_{bv} 为沙坝的体积。针对沙坝形态参数, 前人进行了较为系统的研究, 提出了不同的计算公式 (见表 1)。Hsu^[14] 根据实验和理论工作, 认为任意角度的波浪均可以使海滩形成平衡剖面, 并在此基础上确定了离岸沙坝的几何参数和计算公式, 但该公式主要是基于风暴海滩剖面得出的, 对于其他类型海滩剖面的适应性有待进一步验证。Günaydin 和 Kabdasli^[15] 利用物理模型研究了在规则波和不规则波作用下的水下沙坝参数, 并利用线性回归方法获得了模型函数; 其公式的优点主要是系统考虑了不同类型的波浪对沙坝形态的影响, 但并未体现粒度对沙坝形态的影响。Kömürçü 等^[16] 通过物理模型, 系统分析了沙坝形态与波高、周期、底床坡度以及底质粒度等参数的关系, 是研究沙坝参数较为综合和全面的公式。之后, Kömürçü 等^[17] 又首次将神经网络方法引入了海滩剖面的沙坝形态参数的计算中, 进一步提高了公式的计算精度, 但其公式依然是基于物理模型的实验数据得出的, 缺少实测数据的验证。

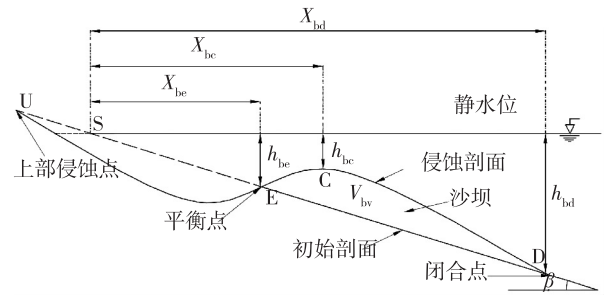


图 1 沙坝形态参数

Fig. 1 Selected bar-shape parameters

表 1 沙坝参数计算方程

Table 1 Currently used equations for determination of bar parameters

来源	方程	编号
Hsu ^[14]	$X_{bc}/L_0 = 1.9\xi_0^{-1.42}; X_{bd}/L_0 = 0.40\xi_0^{-1.12} (\xi_0 = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H_0/L_0}})$	(1)
Günaydin 和 Kabdasli ^[15]	$X_{bc} = 113.98(\tan\beta \sqrt{H_s/L_0})^{1.9762} L_0; X_{bd} = 64.966(\tan\beta \sqrt{H_s/L_0})^{1.6754} L_0$ $h_{bc} = 3.2041(\tan\beta \sqrt{H_s/L_0})^{1.413} L_0; h_{bd} = 102.33(\tan\beta \sqrt{H_s/L_0})^{1.1813} L_0$	(2)
Kömürçü 等 ^[16]	$X_{bc}/L_0 = -0.5803 + \exp(0.6508 - 11.471m + 9.0126H_0/L_0 + 0.0347H_0/wT)$ $X_{bd} = -1.9728 + \exp(1.9311 - 13.1274m + 0.2706T + 3.4662H_0 - 1.0085d_{50})$ $h_{bc} = 0.0101m^{-0.6489} T^{0.5842} H_0^{0.6807} d_{50}^{-0.2267}$ $X_{bd} = 0.7151m^{-0.6804} T^{0.5947} H_0^{0.4864} d_{50}^{-0.1404}$ $V_{bv} = -0.160 + \exp(-2.1003 - 0.2414m + 0.4698T + 4.3243H_0 - 1.2864d_{50})$	(3)
Kömürçü 等 ^[17]	$X_{bc} = \frac{13.6}{1 + e^{-(F_1 - 9.1206)}}; X_{bd} = \frac{13.6}{1 + e^{-(F_2 + 1.2078)}}; X_{bd} = \frac{13.6}{1 + e^{-(F_3 - 6.2828)}}$ $h_{bc} = \frac{0.5637}{1 + e^{-(F_4 - 1.0711)}}; V_{bv} = \frac{0.5637}{1 + e^{-(F_5 + 0.8054)}} (F_1 - F_5 \text{ 以矩阵形式计算})$	(4)

注: 式(1)一式(4)中 ξ_0 为伊里巴伦数; H_s 为有效波高; H_0 为深水波高; L_0 为深水波长; d_{50} 为中值粒径; $m = \tan\beta$, 为底床坡度; w 为沉降速度; F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 均为矩阵。

2 沙坝迁移的理论及动力机制

2.1 沙坝形成和迁移理论

目前关于沙坝的形成和迁移存在两种理论: 一种为强迫响应理论^[18], 另一种为自组织理论^[19-20]。强迫响应理论认为, 沙坝的形成是对流体动力强制作用的被动响应, 在稳定时, 海岸剖面与这些流体动力有着相同的长度尺度, 破波是形成水下沙坝最重要的因素, 破波控制着沙坝的离岸位置、尺寸及其产生的水深^[21]。自组织理论则认为, 平面斜坡海底剖面是一种不稳定的海岸剖面形态, 对任意小扰动都会造成剖面的不断发展形成沙坝剖面, 这一理论主要涉及流体动力同海岸相互作用的不稳定性理论^[22]。Hoefel 和 Elgar^[8] 提出了一种基于波浪流体加速度的泥沙运输机制, 用于模拟沙坝的向岸迁移; Stive 和 Reniers^[9] 却认为底床的自组织作用使得沙坝向岸迁移难以预测, 需要进一步加强物理过程的观测和机制研究。虽然自组织理论目前得到越来越多的认可和支持, 但 Castelle 等^[23] 认为无论是强迫响应理论还是自组织理论, 都无法合理解释大空间

尺度下(几百米到数千米)的沙坝形成和演化。Coco 和 Murray^[24] 和 Almar 等^[11] 的研究也表明,沙坝的形成与迁移可能是沙坝的自组织演化与水动力强制作用共同驱动的结果。也就是说,海滩剖面首先需要在流体动力的强制作用下达到其变化的临界条件,然后在海底和流体的相互作用下不断演化^[25]。可以看出,对于沙坝形成和迁移的理论,目前尚未有统一认识,其主要原因是观测数据不够全面,观测手段有待提高,物理过程及动力机制尚不完全清楚^[26],而将强迫响应理论和自组织理论相结合,或许可以更合理地解释沙坝的形成机理和迁移机制(图2)。

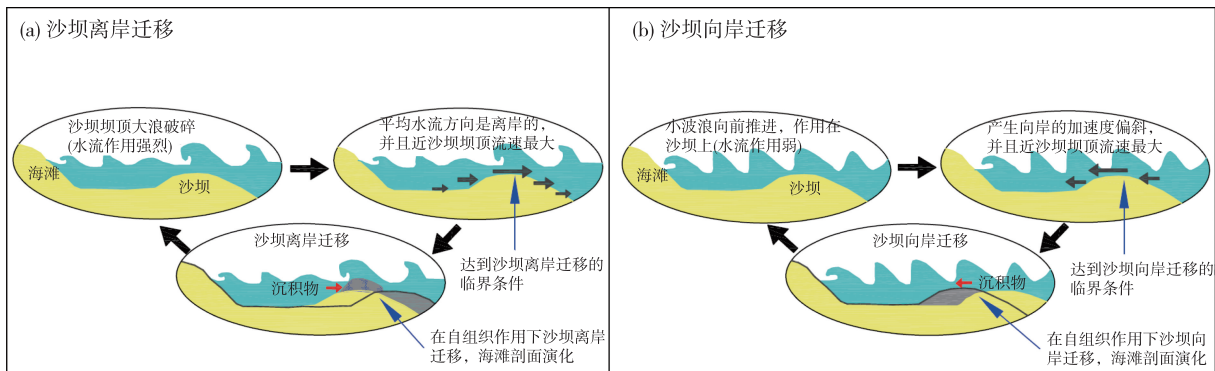


图2 沙坝迁移动力机制示意(修改自 Hoefel 和 Elgar^[8])

Fig. 2 Schematic of the feedbacks that drive sandbar migration

2.2 沙坝迁移的动力机制

水下沙坝动态变化的时间尺度可以分为短期(小时到数天)、中期(数周到数月)以及长期(数月到数年)^[3]。沙坝迁移主要受控于波浪能量的变化情况,当波浪能量较低时,沙坝缓慢地向岸移动^[27],最终可能并入后滨,形成坡度较大的滩肩型海滩剖面;而当波浪能量以及波浪驱动的环流增强后,沙坝则迅速向海移动^[28],形成了以水下沙坝为特征的海滩剖面^[29]。就个体沙坝而言,一般存在3个不同的演化阶段:近岸产生、向海迁移以及外部衰退。沙坝演化的循环周期一般为1~15 a,其演化过程与波浪能量耗散的空间和时间模式有关,能量耗散的临界值可以根据有效破碎波高、均方根波高以及平均波高确定^[30]。

在短期时间尺度下,引起沙坝离岸迁移的主要动力机制为沙坝顶部波浪破碎产生的强大离岸流,从而导致沙坝处的泥沙向海搬运,这一观点目前已被普遍认可^[31-32]。在长期时间尺度下(年际),沙坝有时呈现一种与波浪作用不相关的自组织行为,表现为周期性连续的净离岸迁移^[33]。同时,这种净离岸迁移也受到多种因素的影响,主要包括沙坝形态、波浪能量、岸线走向以及沙坝体积。其中,近岸地貌和沙坝形态可以影响沙坝迁移特征,沙坝体积和波候能够影响沙坝的迁移速率,海岸坡度、沙坝区宽度以及沙坝迁移速率的耦合作用则控制沙坝净离岸迁移的持续时间^[34]。但是,引起沙坝向岸迁移的动力机制则较多,争论也最大。目前,关于沙坝向岸迁移的动力机制主要包括加速度偏斜^[8]、速度偏斜^[25]、非线性波浪边界层^[27]、斯托克斯漂移^[35]以及近底泥沙的层化制紊效应^[36]等。加速度偏斜作为波浪不对称性的一个重要量度,可以用来描述底床剪切力相位偏移以及随时间变化的压力梯度等作用;不对称波浪产生的向岸方向的流动加速度对底床泥沙的携带作用显著,可以造成泥沙向岸运移,同时沙坝也随之缓慢增长^[8]。速度偏斜用来描述浅水表面重力波的演化过程(波峰变窄、波谷变宽阔和平坦),该作用可以驱动沙坝向岸运移,且迁移速率较大^[32],但 Austin 等^[37]认为其对泥沙向岸搬运的作用较小。非线性波浪边界层作用通常扩展至距离底床5~10 cm 以上的区域,在这个区域由于底摩擦的作用产生了强烈的水体扰动;同时,由于向岸传播的波浪产生向岸的动量,其在波浪边界层区域导致近底层水体向岸流动,该流速在沙坝顶部最大,从而导致沙坝向岸迁移^[27]。斯托克斯漂移与欧拉边界层流一样,在低能量条件下,其作用方向是向岸的,在沙坝坝顶的作用最强,从而导致沙坝向岸迁移^[35]。近底泥沙的层化制紊效应主要是由于泥沙浓度垂向梯度的快速降低造成的,这种变化限制了泥沙向上层水体的扩散,从而增强了近底泥沙的输运^[38],因此,当波峰产生向岸方向的峰值流速

时,泥沙就会快速向岸输运,沙坝随之向岸迁移。

实际上,沙坝的迁移并不是受单一机制控制。波浪产生的动量通量和斯托克斯漂流共同作用使得沙坝向岸迁移^[39];波浪作用与近底床泥沙产生的层化制紊效应共同驱动沙坝迁移^[36];Ruessink等^[7]的研究结果也表明,沙坝迁移在近底加速度偏斜和底沙输运与沙坝耦合的共同作用下进行。此外,沙坝坝顶以上的水位、波浪倾斜度也是控制沙坝迁移的关键参数,沙坝坝顶以上的水位主要影响沙坝迁移的方向,波浪倾斜度则主要控制沙坝迁移速率的量级^[32]。底床渗流是指波浪作用下水体通过饱和底床的循环渗入/渗出^[40],能够改变泥沙输运模式,对底床剪切力也会产生一定影响,进而影响沙坝迁移^[37]。斜坡效应则主要起到阻挡沙坝向岸迁移作用^[32],而沙坝迁移之前的状态也会对其迁移产生影响^[41]。

此外,人类活动如人工构筑物、海滩补沙等也会对沙坝迁移产生影响。人工构筑物可以改变水动力条件,从而改变泥沙的输运特征,进而影响沙坝迁移以及海滩剖面演化。然而,由于构筑物和海滩之间的耦合作用,使得本就复杂的沙坝演化更加难以预测,需要更多实测数据和实验数据加以分析^[42]。海滩补沙作为一种海滩修复的手段,一直受到研究人员的关注。海滩补沙会改变海滩剖面的形态,并影响沙坝的演化。比如,在两个沙坝之间的沟槽补沙后,虽然沙坝-沟槽地貌会立刻进入新的动态调整,但海滩补沙可以使沙坝的演化周期推迟达6~7 a^[43]。实际上,在海滩不同的位置补沙,其对沙坝迁移和海滩剖面的影响也不尽相同,而要真正理解它们之间的相互作用则需要进一步的研究^[44]。

3 数值模拟的应用

随着计算机技术的不断发展和沙坝理论研究的日益完善,数值模拟在沙坝研究中得到了广泛应用^[36],已成为探讨沙坝迁移和演化的最重要和最常见的方法^[4, 7, 45-47]。目前模拟沙坝横向迁移(数天到数年的时间尺度)的数学模型主要包括3种类型:基于破波点模式用于计算从平衡位置开始的沙坝迁移模型^[48]、基于神经网络的数据驱动模型^[49-51]、以波相平均为基础基于作用过程的模型^[7, 31, 45]。

基于破波点模式的数学模型可以不必涉及单次波浪或者波群对泥沙输运的细节问题,而是考虑连续波浪作用下的沙坝迁移,其迁移趋向于基于波高平衡位置的方向,该模型已被成功应用于不同区域的沙坝迁移的模拟^[52],其控制方程如式(5)所示。但是,该模型也存在3方面的问题:①沙坝迁移与波高的关系尚不明确^[49];②即使在稳定的波浪作用下,沙坝也不一定向平衡位置迁移,而有可能发生衰退^[53];③由于波浪作用下沙坝位置变化较快,很难通过观测来估计沙坝向平衡位置的迁移速率^[48]。

$$\frac{d}{dt}x(t) = \frac{1}{\tau}[x_{eq}(t) - x(t)] \quad (5)$$

式中: d 为离散差分算子; x 为沙坝位置; x_{eq} 为平衡位置; t 为时间; τ 为沙坝响应时间。

数据驱动模型由于可以不考虑地貌演化的物理机制,目前也广泛应用于沙坝研究^[3, 54],其控制方程如式(6)所示。但是,数据驱动模型本身就存在一定问题^[41]:①该模型的方程无法从物理角度解释,同时也不具有普遍意义;②这些模型只能基于已有的校正后的数据来获得沙坝的迁移特征,这就需要大量高精度的原始数据作为支撑,而这些数据一般很难获取;③虽然该模型能够准确地模拟高能量下的沙坝迁移,但对于低能量下的沙坝迁移以及沙坝长周期尺度下离岸方向的迁移模拟尚不够准确。

$$\hat{U}(t) = \Pi(\hat{U}(t-1), \dots, \hat{U}(t-M); I(t), \dots, I(t-N) | \mathbf{W}) \quad (6)$$

式中: Π 为神经网络转化函数; \mathbf{W} 为神经网络的权重矩阵; t 为时间; $\hat{U}(t)$ 为模型输出结果; $I(t)$ 为输入模型的外部作用; M 为自回归阶数; N 为外部作用的阶数。

基于波浪作用过程的数学模型已成功地模拟了时间尺度从数小时^[32]、数天^[55]、数周^[7]至多年^[31, 45]的沙坝迁移和演化,其控制方程如式(7)所示。但由于波浪、泥沙输运等作用过程的非线性特点,在数值模拟过程中容易产生误差的积累,从而降低长期尺度下沙坝迁移数值模拟的准确性^[48]。此外,目前的模型大多

未考虑波浪和近底回流的耦合作用,从而影响了模拟结果的精确性。

$$\frac{\partial z(x',t)}{\partial t} = -\frac{1}{1-p} \frac{\partial q_{\text{net}}(x',t)}{\partial x'} \quad (7)$$

式中: z 为底床高程; x' 为海滩横剖面位置; p 为底床孔隙度; q_{net} 为泥沙净输运通量。

虽然数值模拟的方法得到不断发展和应用,但是这些模型仍存在大量限制,尚需进一步修改完善。比如,大多数模型忽略了加速度偏斜对泥沙横向输运的贡献,而这种作用能够搬运泥沙向岸运移,对于精确模拟浅水沙坝向岸迁移是一个必要的因素^[32]。此外,考虑泥沙产生的层化因素可以有效提高沙坝迁移的模拟精度^[36],波浪偏斜度对于精确模拟高能量条件下沙坝离岸迁移具有至关重要的作用^[32],沿岸流对于模拟沙坝迁移也同样具有不可忽视的作用^[31],但是目前的模型大多未考虑相关因素。造成这种模型限制的主要原因有两个:①目前尚不完全清楚引起泥沙输运的各种模式的物理机制;②如何将相关机制加入到海滩剖面模型中的技术亦尚待提高。最近,数学模型的改进主要体现两个方面:①对于物理机制的改进,主要是完善模型中关于加速度偏斜、速度偏斜以及沿岸流等机制在沙坝迁移过程中的作用及过程^[31],以进一步提高数学模型的准度和精度;②模型维数的提高,目前的沙坝演化模型主要以一维模式为主^[8,36],下一步的重要方向就是将控制泥沙横向输运的动力机制应用到二维动力地貌模型中^[19],以进一步提高和完善相关机制在沙坝向岸和离岸迁移转换中的作用^[56]。

4 结论和展望

(1) 沙坝迁移过程的空间差异。不同的地貌形态对水动力的响应特征不同,而沙坝形态空间上的变化必然导致其不同位置的迁移速率和迁移过程存在差异,而这种空间差异最终会在海滩形态的变化上得以体现。但是,目前针对沙坝迁移过程的研究仍以一维线性变化为主,而沙坝本身具有二维和三维空间上的多变性,其对水动力的响应表现出空间上的多尺度性。因此,探讨沙坝迁移的动力机制应尽量建立在沙坝迁移过程空间差异的研究之上。

(2) 沙坝迁移的临界条件。沙坝在较低波浪能量条件下向岸缓慢迁移,而在较强波浪能量条件下则快速向海移动,其向岸和离岸迁移的临界值可以根据破波时沙坝坝顶的平均波高与坝顶水深的比值确定。但该临界条件主要以一维海滩剖面形态为基础,仅考虑波浪与泥沙间的线性对应关系,而并未考虑基于波浪能量、沙坝形态、水深地形和沉积物粒度等方面的综合因素。因此,如何确定沙坝向岸和离岸迁移的临界条件还有待进一步探讨。

(3) 波浪破碎对近底泥沙运动和沙坝迁移的影响。沙坝的迁移通常在波浪的主导作用下进行,波浪破碎会引起较大的水体紊动,并改变近底泥沙运动和沙坝迁移的特征。然而,由于海滩复杂多变的动力过程,目前,关于波浪破碎对沙坝迁移的影响,无论是对动力机制的认识还是基于现有机制的数值模拟方法的应用,其研究都尚不成熟。

(4) 数学模型的改进。数值模拟目前已成为探讨沙坝迁移最重要和最常见的方法,然而这些模型都存在一定不足,无法满足不同时间尺度和空间尺度下沙坝迁移模拟的要求,也无法精确模拟沙坝向岸、离岸迁移的转化过程。由于水动力、泥沙输运以及沙坝迁移之间的耦合作用,目前仍存在许多尚未解决的机理问题,这些数学模型也有待进一步完善。

(5) 沙坝迁移与泥沙输运的耦合机制。沙坝迁移归根结底是一种泥沙输运的问题,沙坝形态、位置的变化将引起泥沙输运通量的改变,泥沙输运的变化也同时会对沙坝迁移产生决定性影响,两者相互作用、相互影响,共同发生变化。但是,由于受到测量数据、观测手段的限制以及物理过程尚不完全清楚等诸多因素的影响,目前,对于沙坝迁移与泥沙输运耦合机制的研究程度相对较低。

参考文献:

- [1] LEVOY F, ANTHONY E J, MONFORT O, et al. Formation and migration of transverse bars along a tidal sandy coast deduced from

- multi-temporal Lidar datasets [J]. *Marine Geology*, 2013, 342(4): 39-52.
- [2] GUEDES R M C, CALLIARI L J, HOLLAND K T, et al. Short-term sandbar variability based on video imagery: comparison between time-average and time-variance techniques [J]. *Marine Geology*, 2011, 289(1/2/3/4): 122-134.
- [3] MÚNERA S, OSORIO A F, VELÁSQUEZ J D. Data-based methods and algorithms for the analysis of sandbar behavior with exogenous variables [J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 72: 134-146.
- [4] ZHANG W, WU J Z, LI W R, et al. Beach morphology and coastline evolution in the southern Bohai Strait [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2015, 14(5): 803-815.
- [5] LEONARDO D D, RUGGIERO P. Regional scale sandbar variability: observations from the US Pacific Northwest [J]. *Continental Shelf Research*, 2015, 95: 74-88.
- [6] AAGAARD T, GREENWOOD B, HUGHES M. Sediment transport on dissipative, intermediate and reflective beaches [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 124(3): 32-50.
- [7] RUESSINK B G, KURIYAMA Y, RENIERS A J H M, et al. Modeling cross-shore sandbar behavior on the timescale of weeks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(F03010): 1-15.
- [8] HOEFEL F, ELGAR S. Wave-induced sediment transport and sandbar migration [J]. *Science*, 2003, 299(5614): 1885-1887.
- [9] STIVE M J F, RENIERS A J H M. Sandbars in motion [J]. *Science*, 2003, 299(5614): 1855-1856.
- [10] COCO G, SENECHAL N, REJAS A, et al. Beach response to a sequence of extreme storms [J]. *Geomorphology*, 2013, 204(1): 493-501.
- [11] ALMAR R, CASTELLE B, RUESSINK B G, et al. Two-and three-dimensional double-sandbar system behaviour under intense wave forcing and a meso-macro tidal range [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(7): 781-792.
- [12] ARMAROLI C, CIAVOLA P. Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: a video-based morphological classification [J]. *Geomorphology*, 2011, 126(1/2): 201-216.
- [13] OJEDA E, GUILLÉN J, RIBAS F. Dynamics of single-barred embayed beaches [J]. *Marine Geology*, 2011, 280(1/2/3/4): 76-90.
- [14] HSU T. Geometric characteristics of storm-beach profiles caused by inclined waves [J]. *Ocean Engineering*, 1998, 25(1): 69-84.
- [15] GÜNAYDIN K, KABDASLI M S. Investigation of offshore bar geometry under regular and irregular waves [J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(2): 374-382.
- [16] KÖMÜRÇÜ M I, ÖZÖLÇER I H, YÜKSEK Ö, et al. Determination of bar parameters caused by cross-shore sediment movement [J]. *Ocean Engineering*, 2007, 34(5/6): 685-695.
- [17] KÖMÜRÇÜ M I, KÖMÜR M A, AKPINAR A, et al. Prediction of offshore bar-shape parameters resulted by cross-shore sediment transport using neural network [J]. *Applied Ocean Research*, 2013, 40: 74-82.
- [18] HOLMAN R A, SALLENGER A H. Sand bar generation: a discussion of the duck experiment series [J]. *Journal of Coastal Research*, 1993, SI(15): 76-92.
- [19] FALQUÉS A, DODD N, GARNIER R, et al. Rhythmic surf zone bars and morphodynamic self-organization [J]. *Coastal Engineering*, 2008, 55(7/8): 622-641.
- [20] RIBAS F, de SWART H E, CALVETE D, et al. Modeling waves, currents and sandbars on natural beaches: the effect of surface rollers [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 88(1): 90-101.
- [21] YU J, MEI C. Formation of sand bars under surface waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 416: 315-348.
- [22] CAPLAIN B, ASTRUC D, REGARD V, et al. Cliff retreat and sea bed morphology under monochromatic wave forcing: experimental study [J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2011, 343(7): 471-477.
- [23] CASTELLE B, BONNETON P, DUPUIS H, et al. Double bar beach dynamics on the high-energy meso-macro-tidal French Aquitanian Coast: a review [J]. *Marine Geology*, 2007, 245(1/2/3/4): 141-159.
- [24] COCO G, MURRAY A B. Patterns in the sand: from forcing templates to self-organization [J]. *Geomorphology*, 2007, 91(3/4): 271-290.
- [25] MARIÑO-TAPIA I J, O'HARE T J, RUSSELL P E, et al. Cross-shore sediment transport on natural beaches and its relation to sandbar migration patterns; 2: application of the field transport parameterization [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(C03002): 1-12.

- [26] NEL R, CAMPBELL E E, HARRIS L, et al. The status of sandy beach science: past trends, progress, and possible futures [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 150: 1-10.
- [27] TROWBRIDGE J, YOUNG D. Sand transport by unbroken water waves under sheet flow conditions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(C8): 10971-10991.
- [28] van ENCKEVORT I M J, RUESSINK B G. Video observations of nearshore bar behaviour: part 1: alongshore uniform variability [J]. *Continental Shelf Research*, 2003, 23(5): 501-512.
- [29] 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 C B, CHEN J, CHENG Y Z, et al. Study of sediment transport by tsunami waves: I: beach profile evolution [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(5): 665-672. (in Chinese))
- [30] HOUSER C, GREENWOOD B. Profile response of a lacustrine multiple barred nearshore to a sequence of storm events [J]. *Geomorphology*, 2005, 69(1/2/3/4): 118-137.
- [31] WALSTRA D J R, RENIERS A J H M, RANASINGHE R, et al. On bar growth and decay during interannual net offshore migration [J]. *Coastal Engineering*, 2012, 60(2): 190-200.
- [32] DUBARBIER B, CASTELLE B, MARIEU V, et al. Process-based modeling of cross-shore sandbar behavior [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 95(1): 35-50.
- [33] RUESSINK B G, PAPE L, TURNER I L. Daily to interannual cross-shore sandbar migration: observations from a multiple sandbar system [J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(14): 1663-1677.
- [34] ALEMAN N, ROBIN N, CERTAIN R, et al. Net offshore bar migration variability at a regional scale: inter-site comparison (Languedoc-Roussillon, France) [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 118(65): 1715-1720.
- [35] DEIGAARD R, JAKOBSEN J B, FREDSSØE J. Net sediment transport under wave groups and bound long waves [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C6): 13559-13575.
- [36] FALCHETTI S, CONLEY D C, BROCCINI M, et al. Nearshore bar migration and sediment-induced buoyancy effects [J]. *Continental Shelf Research*, 2010, 30(2): 226-238.
- [37] AUSTIN M, MASSELINK G, O'HARE T, et al. Onshore sediment transport on a sandy beach under varied wave conditions: flow velocity skewness, wave asymmetry or bed ventilation? [J]. *Marine Geology*, 2009, 259(1/2/3/4): 86-101.
- [38] CONLEY D C, FALCHETTI S, LOHMANN I P, et al. The effects of flow stratification by non-cohesive sediment on transport in high-energy wave-driven flows [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 610(1): 43-67.
- [39] HENDERSON S M, ALLEN J S, NEWBERGER P A. Nearshore sandbar migration predicted by an eddy-diffusive boundary layer model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C06024): 1-15.
- [40] KARAMBAS T V. Modelling of infiltration-exfiltration effects of cross-shore sediment transport in the swash zone [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2003, 45(1): 63-82.
- [41] PAPE L, RUESSINK B G. Neural-network predictability experiments for nearshore sandbar migration [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(9): 1033-1042.
- [42] LASHTEH NESHAEI M A, HOLMES P, GHOLIPOUR SALIMI M. A semi-empirical model for beach profile evolution in the vicinity of reflective structures [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(17/18): 1303-1315.
- [43] GRUNNET N M, RUESSINK B G. Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment [J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(2): 119-137.
- [44] 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.
- [45] KURIYAMA Y. Process-based one-dimensional model for cyclic longshore bar evolution [J]. *Coastal Engineering*, 2012, 62(4): 48-61.
- [46] 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 C, ZHENG J H, WANG Y G. Numerical simulation of wave-induced sandbar formation [J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 104-109. (in Chinese))
- [47] 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 C, WANG Y G, ZHENG J H. Review of the vertical structure of wave-induced currents [J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(5): 739-746.

(in Chinese))

- [48] PAPE L, PLANT N G, RUESSINK B G. On cross-shore migration and equilibrium states of nearshore sandbars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(F03008): 1-16.
- [49] PAPE L, RUESSINK B G, WIERING M A, et al. Recurrent neural network modeling of nearshore sandbar behavior [J]. *Neural Networks*, 2007, 20(4): 509-518.
- [50] PAPE L, KURIYAMA Y, RUESSINK B G. Models and scales for cross-shore sandbar migration [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(F03043): 1-13.
- [51] KURIYAMA Y, YANAGISHIMA S. Investigation of medium-term barred beach behavior using 28-year beach profile data and rotated empirical orthogonal function analysis [J]. *Geomorphology*, 2016, 261(3): 236-243.
- [52] PLANT N G, TODD HOLLAND K, HOLMAN R A. A dynamical attractor governs beach response to storms [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(17): 1-6.
- [53] GRASSO F, MICHALLET H, BARTHÉLEMY E, et al. Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology: transients and equilibrium states [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C09001): 1-15.
- [54] MUÑOZ-PEREZ J J, NAVARRO M, ROMAN-SIERRA J, et al. Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method [J]. *Geomorphology*, 2009, 112(1/2): 167-177.
- [55] 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.
- [56] MICHALLET H, CASTELLE B, BARTHÉLEMY E, et al. Physical modeling of three-dimensional intermediate beach morphodynamics [J]. *Journal of Geophysical Research(Earth Surface)*, 2013, 118(2): 1045-1059.

A review of cross-shore migration of nearshore sandbar *

HU Rijun^{1,2}, WU Jianzheng^{1,2}, PING Dong^{1,3}, MA Fang⁴, ZHU Longhai^{1,2}

(1. *College of Marine Geoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Key Lab. of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;* 3. *School of Science and Engineering, University of Dundee, Dundee DD1 4HN, Scotland;*

4. *North China Sea Branch of the State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China)*

Abstract: Sandbars are the main morphological features of many wave-dominated sandy coasts and their dynamic behavior can serve as an important indicator for assessing beach stability. This paper presents a review of the progress and problems of the research on the cross-shore migration of nearshore sandbars including the bar-shape parameters, the formation theories, migration mechanisms and the methods of numerical simulation. Although considerable research on sandbar migration has been carried out by researchers both in China and abroad, there are still many problems that remain to be solved due to the complexity of dynamic processes involved, especially the coupling process between sediment transport and sandbar migration. The review highlights areas for further studies, which include differences in spatial characteristics of sandbar migration, the threshold of sandbar migration, the influence of breaking waves on near-bottom sediment transport, sandbar migration, the improvements of numerical models and the interaction mechanism between sediment transport and sandbar migration.

Key words: submerged sandbars; bar-shape parameters; sandbar migration; dynamic mechanism; numerical simulation

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51479182; No. 41106039).