

# 海滩冲流带水沙运动综述

潘毅<sup>1</sup>, 陈自怡<sup>1</sup>, 刘焯<sup>1</sup>, 朱芳芳<sup>2</sup>, 匡翠萍<sup>3</sup>

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 南京 210024; 2. 宁波诺丁汉大学理工学院, 浙江宁波 315100;

3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 简述了冲流带水沙运动的基本特征, 综述了入渗或出渗、段波紊动、泥沙平流、沉降或冲刷延后以及沿岸流、波浪-冲流相互作用和波群作用对冲流带水沙运动影响的最新研究进展; 介绍了冲流带水沙运动物理实验的实现方式以及物理实验中冲流带泥沙运动观测技术的最新进展, 论述了用于冲流带水沙运动研究的 2 类数学模型, 并讨论了各自的优缺点。最后, 探讨了现有研究成果和研究方法的局限性, 并给出了未来的研究展望。

**关键词:** 冲流带; 水沙运动; 海岸泥沙

**中图分类号:** P737.1

**文献标志码:** A

## Review on Water-sediment Movement in Swash Zone

PAN Yi<sup>1</sup>, CHEN Ziyi<sup>1</sup>, LIU Ye<sup>1</sup>, ZHU Fangfang<sup>2</sup>, KUANG Cuiping<sup>3</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Faculty of Science and Engineering, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315100, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In this paper, the basic characteristics of water-sediment movement in swash zone are described, and the latest research progress on the influence of infiltration or exfiltration, bore turbulence, sediment advection, settling or scour lag, longshore current, wave-swash interaction and wave group on the water-sediment movement in the swash zone is summarized. The basic facilities of physical experiments on the water-sediment movement in the swash zone are introduced, and the latest progress of the observation technology of the sediment movement in the swash zone is reviewed. Two types of numerical models used to study the water-sediment movement in the swash zone are presented, and their advantages and disadvantages are investigated. The

limitations of existing research methods and results are discussed, and the future research prospects are proposed.

**Keywords:** swash zone; water-sediment movement; coastal sediment

冲流带指海域和陆域之间的波浪爬高区, 是沙质海岸带中泥沙运动最剧烈的区域之一<sup>[1]</sup>。冲流带输沙在沙质海岸的向岸-离岸输沙和沿岸输沙中均有重要占比<sup>[2]</sup>, 在动力较弱的海岸中甚至占主导地位<sup>[3-4]</sup>。研究冲流带的水沙运动过程对海岸动力研究具有重要的理论意义。另一方面, 随着海岸软防护手段在有效性、生态性和性价比上优势的凸显, 人工养滩等海岸软防护手段逐渐成为海岸防护的主流<sup>[5-7]</sup>, 对海岸水沙运动(包括冲流带和破波带)的深入理解能够帮助人们科学合理地开展海岸软防护行动, 在此背景下冲流带水沙运动研究更具有现实意义。

冲流过程(即冲流带水体的上冲和回流过程)水体含沙量高、紊动剧烈, 水深小且变化快, 给其观测带来了很大困难, 使冲流带水沙动力过程成为海岸水沙动力领域的难题之一<sup>[2]</sup>。近年来, 随着电导率探头等新型量测手段的出现<sup>[8]</sup>, 人们对冲流带近底泥沙运动的观测能力得到显著拓展, 冲流带水沙动力过程的研究得到了显著推进。目前国内在冲流带水沙运动方面还缺少综述性论文, 本文从冲流带水沙运动的基本特征、影响因素、物理实验研究方法和数值模拟研究方法 4 个方面入手, 对冲流带水沙运动的最新研究进展进行综述, 为相关科学研究提供参考依据。

收稿日期: 2022-07-22

基金项目: 国家自然科学基金(51979098); 江苏省自然科学基金(BK20181309)

第一作者: 潘毅, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程。E-mail: panyi@hhu.edu.cn

通信作者: 匡翠萍, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为海岸工程。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

## 1 冲流带水沙运动的基本特征

冲流带水流为强非恒定流,水体紊动剧烈,瞬时输沙和岸滩演变强度大,冲流带是沙质海岸泥沙运动最剧烈的区域之一。冲流过程可以分为上冲和回流过程,在这2个过程中悬移质和推移质/层移质均发挥了重要作用。冲流过程的直接驱动力为破碎波(短波)和次重力波(长波),在反射型海滩更多地由破碎波控制,而在耗散型海滩则更多地由次重力波控制。冲流带输沙在沙质海岸的向岸-离岸输沙和沿岸输沙中均有重要占比<sup>[2]</sup>,但从目前研究进展来看,学界对冲流带的研究多针对向岸-离岸输沙,而对其沿岸输沙效应的研究仍在起步阶段,这主要受限于目前对冲流带向岸-离岸输沙的认识不够深入,还欠缺进一步研究其沿岸效应的基础。因此,本文主要聚焦于冲流带的向岸-离岸输沙及其影响因素,对于其沿岸输沙效应未予涉及。

精细的实验测量表明,对于单独的冲流过程,悬移质和层移质输沙主要发生在上冲过程的初期和回流过程的中后期<sup>[9]</sup>,而床面变化则在冲流带下部较为显著<sup>[10]</sup>。现场观测表明,总体上单个冲流过程造成的净输沙通量(不区分方向统计)服从正态分布,而且向岸和离岸方向的数量大致相等;从量级来看,冲流过程造成的输沙通量变化范围很大,多数在 $0\sim 50\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 范围内(单独统计上冲或回流过程,常见的输沙通量范围为 $0\sim 200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ <sup>[11]</sup>),但也有个别冲流过程的输沙通量可以达到数百 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 的量级,这些冲流过程通常与波浪-冲流相互作用有关<sup>[11]</sup>。若把时间尺度拉长,考虑时间序列中不同冲流过程引起的向岸、离岸方向的净输沙率相互抵消,则单个冲流过程造成的平均输沙通量(即考虑正负号的算术平均)在 $\pm 1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ 的量级<sup>[12]</sup>。这一点事实上和直观的认识略有相悖,即自然状态下的海滩在长时间序列中冲流带净输沙率较低,并不是由上冲过程和回流过程净输沙相互抵消引起的,而是由相邻冲流过程净输沙相互抵消引起的,抵消机制的产生原因为单个冲流过程中净输沙和岸滩地形间的负反馈<sup>[11]</sup>。在数个冲流过程中存在一个相对稳定的平衡剖面形状,长时间尺度的净输沙量较小;自然平衡被人为因素(如人工养滩)打破时,则会形成较大的泥沙净输运和显著的岸滩演变。

图1为一个典型冲流过程的水深、流速、输沙示意图。冲流过程中速度时间序列具有离岸偏斜性,即回流过程持续时间明显较长。如果按照传统的流

速-输沙率关系来量化输沙过程就会得到泥沙离岸净输运的结论,但实际上平衡状态的冲流带泥沙净输运非常小,引起这一现象的直接原因为同等流速下上冲过程的输沙率显著大于回流过程。按照Bagnold<sup>[13]</sup>的能量输沙理论来率定输沙率,发现上冲阶段的泥沙输运系数接近回流阶段的2倍<sup>[11]</sup>,这种现象是由一系列促进泥沙向岸输运的物理过程引起的,包括入渗或出渗<sup>[14-15]</sup>、段波紊动<sup>[16]</sup>、泥沙平流<sup>[17]</sup>和沉降或冲刷延后<sup>[18]</sup>等,这些物理过程对冲流带水沙运动的影响将在2节中详述。

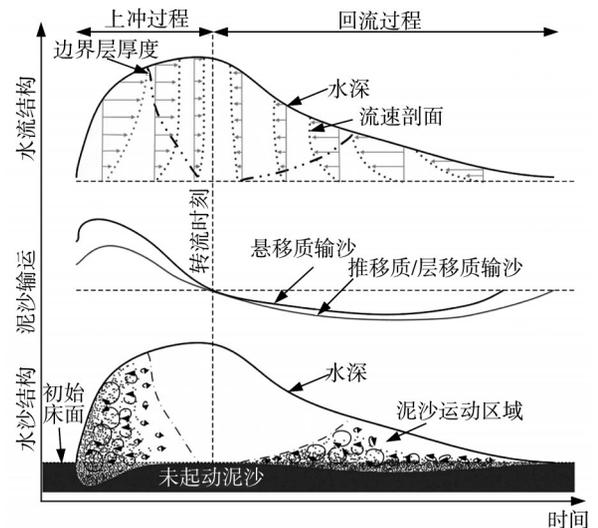


图1 冲流过程中水沙运动示意图(根据文献[2]修改)

Fig.1 Schematic diagram of hydrodynamic and sediment transport processes in a single swash event(Revised according to reference [2])

## 2 冲流带水沙运动的影响因素

除了1节中提到的对速度离岸偏斜具有补偿效应的入渗或出渗、段波紊动、泥沙平流和沉降或冲刷延后等之外,冲流带水沙运动还受沿岸流<sup>[19]</sup>、波浪-冲流相互作用<sup>[10,20]</sup>、波群作用<sup>[21-22]</sup>等其他因素的影响。

### 2.1 入渗或出渗

入渗或出渗过程会影响冲流过程的水流爬高距离(影响可达1 m以上)、爬高水体体积(影响可达33%)及流体动量(可使回流过程流速降低 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上),是影响冲流带边界层发育的主要因素<sup>[14]</sup>。在一个冲流过程中,上冲过程的摩擦系数通常大于回流过程,即同等流速下上冲过程的水体切应力大于回流过程<sup>[23]</sup>,该效应对冲流带流速离岸偏斜引起的离岸输沙有一定的补偿效应。这种切应力的差异

性与入渗或出渗过程有关,原因为上冲过程的入渗导致流线更为贴近床面,致使水流切应力提高<sup>[24]</sup>;回流过程的出渗导致流线更加远离床面,致使水流切应力降低<sup>[25]</sup>。入渗或出渗对冲流带泥沙运动的作用是复合的<sup>[26-28]</sup>,入渗水流除了增强水体切应力以外,还会对泥沙施加一个向下的压力分量,使得泥沙更难起动,反之亦然。此外,渗流还会影响冲流过程的速度不对称性特征,进而影响冲流带的输沙过程<sup>[15,29]</sup>。由于存在不同的影响机制,因此入渗或出渗过程对冲流带输沙的影响受水动力条件和泥沙特征影响较大。总体而言,入渗或出渗过程易促进粗颗粒泥沙的向岸输移和细颗粒泥沙的离岸输移<sup>[30]</sup>,但仍需进一步的研究来厘清入渗或出渗过程对冲流带输沙的具体影响规律。

## 2.2 段波紊动和泥沙平流

段波指位于内破波带的波浪由于剧烈非线性而表现出的峰前陡峭峰后平缓的形态,常伴随着水体紊动。冲流带的一种定义方式为段波的崩破点至波浪爬高最高点之间的滩面,因此段波传播过程中及其崩破时强烈紊动对破波带和冲流带之间的泥沙平流有强烈的促进作用,通常会促使大量破波带的泥沙向冲流带输移,对冲流带流速离岸偏斜引起的离岸输沙起到补偿作用<sup>[31-32]</sup>。研究表明,当波高和水深之比大于0.5时段波开始影响底床泥沙起动<sup>[16]</sup>,引起破波带泥沙向冲流带输移<sup>[17]</sup>。破波带向冲流带的泥沙平流影响冲流带的主要输沙模式和侵淤状态,段波波高是影响冲流带输沙和岸滩演变的重要参数之一<sup>[33]</sup>;数值研究结果表明,段波紊动引起的大量悬浮泥沙中约有12%~35%会在泥沙平流的作用下输移至冲流带或破波带,进而对冲流带和内破波带的岸滩演变模拟结果产生影响<sup>[34-35]</sup>。

冲流带的泥沙平流指泥沙在冲流带内或冲流带与内破波带之间(以悬移质或层移质形式)的远距离搬运。人们最早关注的泥沙平流现象是由段波紊动引起的内破波带到冲流带的泥沙平流。事实上,泥沙平流并不特指内破波带与冲流带之间的泥沙平流,也指冲流带内部的泥沙远距离搬运。泥沙平流的概念用在冲流带主要是为了区别于传统认知中沙质床沙的输移以推移质为主(且受底部切应力控制),其重要表现之一为冲流带中具体位置的输沙率并不一定与该处的动力条件(流速、切应力等)直接相关,还可能受毗邻区域的泥沙通量控制<sup>[16,36]</sup>,该认识为冲流带水沙运动的准确数值计算打下了基础。详见4节论述。

## 2.3 沉降或冲刷延后

沉降或冲刷延后的概念均与泥沙平流相关。沉降延后指水流流速变慢后,泥沙从泥沙平流中减速到落淤之间的时间差<sup>[1]</sup>;冲刷延后指落淤泥沙重新起动需要比维持泥沙平流更大的流速<sup>[1]</sup>,换句话说,泥沙一旦落淤就需要更大的流速才能令其重新起动。这种机制下,泥沙能够随上冲过程输运到更靠岸的位置,并且不易被回流过程的水流带走<sup>[18]</sup>,起到补偿冲流带流速离岸偏斜引起的离岸输沙作用。在数学模型中加入沉降延后的实现机制(在水深平均的水动力模型中考虑近底含沙量和含沙量垂向分布的关系,进而引入悬移质含沙量的沿程变化和垂向差异,使模型能够自发产生一个量级在水深沉速比左右的沉降延后)<sup>[33,37]</sup>,能够计算得到更为合理的向岸输沙结果。

## 2.4 沿岸流

本文不讨论冲流带输沙对沿岸输沙的贡献,但冲流过程和沿岸流的作用是相互的。一方面,冲流带输沙是沿岸输沙的重要组成部分;另一方面,即使不考虑冲流带的沿岸效应而只考虑其引起的向岸-离岸输沙,很多案例中沿岸流的作用也不能忽视。虽然沿岸流不直接产生向岸-离岸输沙效应,但是有些时候沿岸流速很快,会产生额外的水流切应力,导致泥沙起动,增强了向岸-离岸输沙<sup>[38]</sup>。例如,Puleo等<sup>[19]</sup>在一个耗散型海滩的案例研究中发现,沿岸流引起的切应力在冲流带泥沙起动中起到主导作用的时间占比达28%以上。

## 2.5 波浪-冲流相互作用

波浪-冲流相互作用也称冲流-冲流相互作用,指尚未结束的冲流过程与下一个入射波浪(段波)之间的相互作用。波浪-冲流相互作用可分为波浪捕获和波浪-回流相互作用,分别指新的入射波浪与冲流带上冲过程和回流过程的相互作用,后者又可根据回流是否强于入射波浪分为强、弱波浪-回流相互作用<sup>[39]</sup>。波浪-冲流相互作用会引起剧烈的水体紊动和大量悬沙,对冲流带内部和冲流带与破波带之间的泥沙平流有重要影响。Blenkinsopp等<sup>[12]</sup>基于现场观测指出,波浪-冲流相互作用发生时会引起显著大于其他冲流过程的净输沙(净输沙量可达普通冲流过程的100倍以上)和床面变形,这一点在后续的物理实验研究中得到证实<sup>[20]</sup>。然而,并非所有类型的波浪-冲流相互作用都会促进泥沙起动,如波浪捕获类型的波浪-冲流相互作用发生时,过强的入射波会压制上一个冲流过程的水体紊动,反而弱化了泥

沙的起动过程<sup>[20]</sup>。从不同海滩类型来看,反射型海滩的回流过程更为强烈,易发生强波浪-回流相互作用,回流过程和下一个入射波浪的相互作用会引起更多的泥沙悬浮,从而引发向海的泥沙平流,造成冲流带泥沙损失;耗散型海滩的波浪-冲流相互作用的发生频率更高,但强波浪-回流相互作用的发生频率降低,进而降低了向海的泥沙平流程度<sup>[40]</sup>。总体而言,波浪-冲流相互作用对冲流带输沙的影响机制和段波紊动类似,其种类、强度<sup>[41]</sup>和作用点位置<sup>[10]</sup>均对冲流带输沙具有重要影响。

## 2.6 波群作用

单个波浪冲流过程引起的纵向泥沙分布与振荡片流类似<sup>[36]</sup>,但受泥沙平流影响,波群引起的冲流过程表现出差异性。在Hsu等<sup>[16]</sup>研究的基础上(见2.2节),van der Zanden等<sup>[8]</sup>进一步指出,波群作用引起的冲流过程中,在强烈的泥沙平流作用下,泥沙起动层非常不显著,这种现象使得层移质输沙同样不总受本地动力条件控制,还可能受毗邻区域的泥沙通量控制。由于波群特征多样,因此冲流带岸滩演变数学模型也非常有必要引入波群效应<sup>[26]</sup>。此外,波群效应也会影响波浪-冲流相互作用的种类,进而间接影响冲流带的泥沙输运和岸滩演变<sup>[8]</sup>。相比于单相波,波群(双相波、随机波)堆积削减冲流带的向岸输沙,在侵蚀条件下增加冲流带的离岸输沙。上述针对波群效应的研究结论是基于对双相波的研究得到的,双相波效应类似于束缚长波。研究表明,与束缚长波相反,自由长波则会促进向岸输沙,因此波群中束缚长波和自由长波的占比对向岸-离岸输沙关系产生重要影响<sup>[21]</sup>。

## 3 物理实验研究方法

与冲流带水沙运动相关的物理实验研究可在波浪水槽、冲流水槽或振荡水槽中进行,冲流带水沙运动的观测是传统难题。近年来,随着电导率探头和高速相机测速技术的发展,冲流带输沙观测能力得到显著提升。

### 3.1 冲流带实验装置

在实验装置上,冲流带水沙运动相关的物理实验大致可以分为3种,即波浪水槽实验、冲流水槽实验和振荡水槽实验。波浪水槽实验在传统的波浪水槽中进行,冲流过程通过推波板造波引起的波浪爬高实现,研究的波浪过程通常包括孤立波<sup>[15,42-43]</sup>、规则波以及不规则波<sup>[20,40]</sup>。波浪水槽实验的优势在于

能够方便地生成波高和波形可控的冲流过程,并且可以实现对数个冲流过程的研究。然而,受限于造波能力,波浪尺度比天然海滩小,由此引起关于粗糙度、渗透性和泥沙运动等因素的比尺效应,此外重复性实现较为困难(这里的重复性指对特定的冲流过程进行基本一致的复演,对重复性实验进行分析以进一步降低实验误差)。冲流水槽实验通常在专用的冲流水槽中进行,通过溃坝波的方式模拟冲流过程<sup>[9,44-45]</sup>。由于冲流水槽可以专门设计,并且可以使用溃坝的方式直接生成爬高水流,因此在冲流水槽中可以产生接近天然条件的典型冲流过程(垂直岸线方向尺度在10~20 m左右)。冲流速度、爬高和水深都与天然滩面上非常类似,避免了比尺效应,而且由于溃坝波可控,因此实验可重复性高。该方法的缺点在于,研究对象仅限1、2个冲流过程,导致无法研究不规则波和波群引起的冲流过程序列。振荡水槽实验通过水槽末端活塞的往复运动生成振荡片流,研究片流引起的层移质输沙规律和侵蚀特征,而不考虑冲流过程的具体波形<sup>[46-47]</sup>。虽然振荡水槽实验并不直接考虑冲流带的波形,但最新研究结果表明,通过振荡水槽实验得到的泥沙输运可以为冲流带输沙提供一个简单的估算方法<sup>[9]</sup>(需注意的是,如2.6节所述,使用振荡片流方法进行估算仅可用于单个冲流过程的泥沙输运)。3种实验方法各有优缺点,波浪水槽实验多用于波群和不规则波对冲流过程的影响研究<sup>[20-21]</sup>,冲流水槽实验多用于单个冲流过程泥沙输运特征研究<sup>[44,48]</sup>,两者也都可用于针对波浪-冲流相互作用的研究<sup>[41,43]</sup>,而振荡水槽实验则主要用于片流输沙机理及其影响因素研究<sup>[46-47]</sup>。

### 3.2 冲流带泥沙运动观测方法

冲流带泥沙运动的测量一直是制约冲流带水沙动力研究的难题。冲流带输沙以悬移质和层移质形式为主。悬移质的测量较为简单,通过率定得当的光学浊度仪(OBS)可以测量水体悬沙浓度,OBS测量可能会受气泡的影响,但总体上有较好的测量效果<sup>[2]</sup>。冲流带内层移质的测量则是困扰学界多年的难题。层移质含沙量高、瞬时输沙量大,OBS等光学测量方法难以奏效。传统研究中,常采用泥沙采集器<sup>[49]</sup>收集某段滩面的落淤泥沙,或者通过密集的滩面地貌形态时空测量<sup>[40]</sup>获取输沙率。前者需要在合适的时机将泥沙采集器放下与抬起,操作困难且易对结果产生影响,后者仅能获得间接的反演输沙率数据。

近年来,电导率探头的应用很大程度上解决了冲流

带近底泥沙运输的观测问题。电导率探头通过水体电导率反推含沙量,可以将其埋置于海滩中并使探头出露滩面,从而采集近底层移质含沙量。事实上,早在20世纪80年代,电导率探头已经用于片流研究中<sup>[50]</sup>,但在近年来才被引入冲流带水沙研究领域<sup>[8,36]</sup>。较早应用于冲流带研究的电导率探头为电导率含沙量仪(CCM)及其升级版(CCM+),能够实现单点含沙量的高频(采样频率达1 000 Hz)测量<sup>[10]</sup>。CCM和CCM+仅能提供单点的含沙量测量,需要大量重复实验、不断调整探头出露高度才能获得近底含沙量剖面。后来出现的电导率剖面含沙量仪(CCP)能够测量一个剖面内的含沙量分布,避免了探头位置的调整,但降低了采样频率。Alsina等<sup>[51]</sup>采用的CCP剖面测量范围为2.8 cm,空间分辨率为1 mm,但测量频率仅为8 Hz,无法捕捉到含沙量变化的高频信息,需要和CCM/CCM+联合使用。

随着高速相机测量技术和粒子图像测速技术(PIV)的发展,图像测量技术在冲流带水沙测量方面也发挥了重要作用,解决了近底高含沙水体的流速测量难题。近年来,多项研究均采用图像处理技术获得了详细的近底输沙速度和流速分布<sup>[40,52-54]</sup>。含沙量测量方面,Wu等<sup>[55]</sup>使用高速相机在严格控制的灯光条件下拍摄了冲流带泥沙运动过程,并根据朗伯-比尔定律,通过计算泥沙颗粒对入射光的吸收率来反推水体含沙量,依此计算了输沙通量。通过图像处理方式获取水体含沙量的方法对于灯光和率定要求较高,相关研究较为少见。

## 4 数值模拟研究方法

冲流带水沙动力数学模型可以分为2类,即波浪平均类和相位解析类。前者基于波浪平均的净输沙公式计算冲流带中长时间尺度的岸滩演变,后者通过相位解析的数学模型复演冲流带的波浪上冲、回流过程及泥沙运动。

### 4.1 波浪平均类

冲流带的波浪平均类数学模型是基于波浪平均的净输沙率来计算多个冲流过程引起的岸滩演变,可用于中长时间尺度岸滩演变的数值模拟。该类模型的理论基础为特征流速和净输沙率之间的关系(净输沙率公式),该关系可以根据希尔兹数或Bagnold<sup>[13]</sup>的能量输沙理论建立<sup>[56]</sup>。在实现方式上,该类模型大同小异,通常由入射波浪条件得到冲流带的初始上冲流速,然后由该流速推算冲流过程中的流速过程,将流速在一个冲流周期内进行积分,通

过该积分的数值来关联初始上冲流速和冲流带内各点的净输沙率<sup>[57]</sup>,积分过程中留下的未定量作为经验参数由模型率定来确定。冲流带的流速过程也可以由实测给出,而非通过初始上冲流速来推算<sup>[58]</sup>。该类模型无须模拟冲流带的水动力过程,可采用相位平均的波浪模型来驱动,使中长时间尺度的岸滩演变数值模拟成为可能。然而,Hsu等<sup>[16]</sup>的研究结果表明,冲流带中具体位置的输沙率并不一定与该处的动力条件直接相关,还可能受毗邻区域的泥沙通量控制,该发现也在后续研究中得到证实<sup>[8,36]</sup>。因此,基于净输沙率公式(输沙率和流速或切应力之间的关系)的数学模型在冲流带中适用性并不强<sup>[59]</sup>,需要依靠基于过程的数学模型来进一步提高冲流带岸滩演变的模拟精度,这也促使近年来冲流带的数值模拟研究朝相位解析类发展。

### 4.2 相位解析类

冲流带的相位解析类数学模型通过求解各类纳维-斯托克斯(N-S)方程来复演冲流过程,通常用于研究一个至数个冲流过程的水沙动力特征,近年来该类模型发展迅速。在水动力方面,主流的流体力学求解方法均在冲流过程模拟中得到了应用,如雷诺平均N-S方程<sup>[60-61]</sup>、非线性浅水方程<sup>[62-65]</sup>和粒子法<sup>[66]</sup>等。泥沙运动计算区分推移质和悬移质输沙,无须通过流速和切应力的积分反推,可直接刻画推移质、悬移质输移过程,加上对入射段波的合理复演(如作为激波处理<sup>[34,67]</sup>),进而解决“冲流带中具体位置的输沙率并不一定与该处的动力条件直接相关”引起的输沙公式不适用问题。推移质输沙的计算方式大同小异,多将推移质输沙率与流速三次方建立关系<sup>[68]</sup>,采用Meyer-Peter-Müller公式<sup>[69]</sup>计算输沙通量,悬移质输沙是基于悬移质引起的泥沙挟带和悬浮泥沙沉降来计算<sup>[34]</sup>,也有研究直接采用离散元方法来模拟冲流带的泥沙颗粒运动过程<sup>[66,70]</sup>。值得一提的是,现有多数该类数学模型对层移质缺少可靠的复演,这成为未来该类数学模型亟需解决的问题之一。有些学者试着对推移质计算方法予以改进,通过考虑近底含沙羽流的方式来考虑推移质的沉降或冲刷延后,从一定程度上可以起到模拟层移质的效果<sup>[71]</sup>。近期相关学者在该类模型的边界层<sup>[63]</sup>和开边界<sup>[72]</sup>处理上作出改进,使其对冲流带水沙过程的复演能力进一步提升。相位解析类数学模型促进了人们对冲流带水沙动力的认知,为冲流带岸滩演变机制研究提供了理论支撑,但限于计算能力,目前的相位解析类数学模型只能做到对数个冲流过程的复

演,难以实现长时间尺度的岸滩模拟。

## 5 结语

本文综述冲流带水沙运动的研究进展,主要聚焦于冲流带的向岸-离岸输沙,包括冲流带水沙运动的基本特征、影响因素、物理实验研究方法和数值模拟研究方法。冲流带水流为强非恒定流,紊动剧烈,瞬时输沙强度大,受到入渗或出渗、段波紊动、泥沙平流、沉降或冲刷延后以及沿岸流、波浪-冲流相互作用和波群作用等一系列因素的影响,而这些因素也会彼此相互作用,从而进一步加大了冲流带水沙运动的复杂性。冲流带水沙运动相关的物理实验研究可在波浪水槽、冲流水槽或振荡水槽中进行。冲流带水沙运动的观测是传统难题,但近年来随着电导率探头和高速相机测速技术的发展,对冲流带输沙(尤其是层移质输沙)的观测能力得到显著提升。冲流带水沙动力数学模型可以分为2类,即波浪平均类和相位解析类。前者基于波浪平均的净输沙公式来计算冲流带中长时间尺度的岸滩演变,后者通过相位解析的数学模型复演冲流带的波浪上冲、回流过程及泥沙运动,两者有各自的适用范围和优缺点。

冲流带水沙运动是沙质海岸水沙运动最剧烈的区域之一,也是目前沙质海岸泥沙研究的最薄弱环节,这主要受限于传统研究中对其复杂水沙运动观测手段的匮乏。近年来随着电导率探头等观测技术的发展,对冲流带的研究取得了显著进展,但仍存在许多需要解决的科学和技术问题。建立冲流带-破波带演变统一模型,回答人工养滩后冲流带和破波带的泥沙交换机制,能够进一步为沙质海岸软防护提供重要的理论基础和研究工具。

### 作者贡献声明:

潘毅:选题提出,论文框架设计,论文写作与修改。

陈自怡:资料查阅,图表绘制,论文写作。

刘焯:资料查阅,论文写作。

朱芳芳:学术指导,论文写作与修改。

匡翠萍:论文框架设计,论文修改。

### 参考文献:

- [1] MASSELINK G, PULEO J A. Swash-zone morphodynamics [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(5): 661.
- [2] CHARDÓN-MALDONADO P, PINTADO-PATIÑO J C, PULEO J A. Advances in swash-zone research: small-scale hydrodynamic and sediment transport processes [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 115: 8.
- [3] JACKSON N L, NORDSTROM K F, FARRELL E J. Longshore sediment transport and foreshore change in the swash zone of an estuarine beach [J]. *Marine Geology*, 2017, 386: 88.
- [4] NORDSTROM K F, JACKSON N L, ALLEN J R, *et al.* Longshore sediment transport rates on a microtidal estuarine beach [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2003, 129: 1.
- [5] TEMMERMAN S, MEIRE P, BOUMA T, *et al.* Ecosystem-based coastal defence in the face of global change [J]. *Nature*, 2013, 504: 79.
- [6] PAN Y, YIN S, CHEN Y P, *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.
- [7] 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. 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.
- [8] VAN DER ZANDEN J, ALSINA J M, CÁCERES I, *et al.* Bed level motions and sheet flow processes in the swash zone: observations with a new conductivity-based concentration measuring technique (CCM) + [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 105: 47.
- [9] PINTADO-PATINO J C, PULEO J A, KRAFFT D, *et al.* Hydrodynamics and sediment transport under a dam-break-driven swash: an experimental study [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 170: 103986.
- [10] VAN DER ZANDEN J, CÁCERES I, EICHENTOPF S, *et al.* Sand transport processes and bed level changes induced by two alternating laboratory swash events [J]. *Coastal Engineering*, 2019, 152: 103519.
- [11] MASSELINK G, HUGHES M. Field investigation of sediment transport in the swash zone [J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(10): 1179.
- [12] BLENKINSOPP C E, TURNER I L, MASSELINK G, *et al.* Swash zone sediment fluxes: field observations [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(1): 28.
- [13] BAGNOLD R A. *The Sea* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1963.
- [14] PINTADO-PATIÑO J C, TORRES-FREYERMUTH A, PULEO J A, *et al.* On the role of infiltration and exfiltration in swash zone boundary layer dynamics [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(9): 6329.
- [15] 曹志刚, 王逸伦, 国振, 等. 考虑渗流效应的冲流带泥沙起动机理研究[J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 114. CAO Zhigang, WANG Yilun, GUO Zhen, *et al.* Study on the

- sediment initiation considering the seepage in the swash zone [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(4): 114.
- [16] HSU T J, RAUBENHEIMER B. A numerical and field study on inner-surf and swash sediment transport [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(5): 589.
- [17] ALSINA J M, FALCHETTI S, BALDOCK T E. Measurements and modelling of the advection of suspended sediment in the swash zone by solitary waves [J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(5/6): 621.
- [18] MASSELINK G, EVANS D, HUGHES M G, *et al.* Suspended sediment transport in the swash zone of a dissipative beach [J]. *Marine Geology*, 2005, 216(3): 169.
- [19] PULEO J A, CRISTAUDO D, TORRES-FREYERMUTH A, *et al.* The role of alongshore flows on inner surf and swash zone hydrodynamics on a dissipative beach [J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 201: 104134.
- [20] ALSINA J M, VAN DER ZANDEN J, CACERES I, *et al.* The influence of wave groups and wave-swash interactions on sediment transport and bed evolution in the swash zone [J]. *Coastal Engineering*, 2018, 140: 23.
- [21] BALDOCK T E, ALSINA J A, CACERES I, *et al.* Large-scale experiments on beach profile evolution and surf and swash zone sediment transport induced by long waves, wave groups and random waves [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(2): 214.
- [22] 李志强, 陈子桑. 海滩冲流带高频振动及碎波带波浪作用的模态分析 [J]. *海洋学报*, 2008(2): 161.  
LI Zhiqiang, CHEN Zishen. Analyses of modes existing in the high frequency fluctuations of beachface and wave actions in the surf zone [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008(2): 161.
- [23] CONLEY D C, GRIFFIN J G. Direct measurements of bed stress under swash in the field [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109: C03050.
- [24] CONLEY D C, INMAN D L. Ventilated oscillatory boundary layers [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 273: 261.
- [25] PERERA E, ZHU F, DODD N, *et al.* Surface-groundwater flow numerical model for barrier beach with exfiltration incorporated bottom boundary layer model [J]. *Coastal Engineering*, 2019, 146: 47.
- [26] TURNER I L, MASSELINK G. Swash infiltration-exfiltration and sediment transport [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103: 30813.
- [27] BALDOCK T E, NIELSEN P. Discussion of “effect of seepage-induced nonhydrostatic pressure distribution on bed-load transport and bed morphodynamics” by Simona Francalanci, Gary Parker, and Luca Solari [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 136(1): 77.
- [28] CHEN W, VAN DER WERF J J, HULSCHER S J M H. A review of practical models of sand transport in the swash zone [J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 238: 104355.
- [29] MASSELINK G, LI L. The role of swash infiltration in determining the beachface gradient: a numerical study [J]. *Marine Geology*, 2001, 176(1/4): 139.
- [30] BUTT T, RUSSELL P, TURNER I. The influence of swash infiltration-exfiltration on beach face sediment transport: onshore or offshore? [J]. *Coastal Engineering*, 2001, 42(1): 35.
- [31] BUTT T, RUSSELL P, PULEO J, *et al.* The influence of bore turbulence on sediment transport in the swash and inner surf zones [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(7/8): 757.
- [32] JACKSON N L, MASSELINK G, NORDSTROM K F. The role of bore collapse and local shear stresses on the spatial distribution of sediment load in the uprush of an intermediate-state beach [J]. *Marine Geology*, 2004, 203(1/2): 109.
- [33] PRITCHARD D, HOGG A J. On the transport of suspended sediment by a swash event on a plane beach [J]. *Coastal Engineering*, 2005, 52(1): 1.
- [34] KOBAYASHI N, JOHNSON B D. Sand suspension, storage, advection, and settling in surf and swash zones [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106: 9363.
- [35] ZHU F, DODD N. Swash zone morphodynamic modelling including sediment entrained by bore-generated turbulence [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 146: 103756.
- [36] PULEO J A, LANCKRIET T, CONLEY D, *et al.* Sediment transport partitioning in the swash zone of a large-scale laboratory beach [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 113: 73.
- [37] PRITCHARD D. Sediment transport under a swash event: the effect of boundary conditions [J]. *Coastal Engineering*, 2009, 56(9): 970.
- [38] AUSTIN M J, MASSELINK G, RUSSELL P E, *et al.* Alongshore fluid motions in the swash zone of a sandy and gravel beach [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(8): 690.
- [39] CÁ CERES I, ALSINA J M. A detailed, event-by-event analysis of suspended sediment concentration in the swash zone [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 41: 61.
- [40] ALSINA J M, CÁ CERES I, BROCCINI M, *et al.* An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone morphological conditions [J]. *Coastal Engineering*, 2012, 68: 31.
- [41] CHEN B T, KIKKERT G A, POKRAJAC D, *et al.* Experimental study of bore-driven swash: swash interactions on an impermeable rough slope [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 108: 10.
- [42] PUJARA N, LIU P L F, YEH H. The swash of solitary waves on a plane beach: flow evolution, bed shear stress and run-up [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 779: 556.
- [43] PUJARA N, LIU P L F, YEH H. An experimental study of the interaction of two successive solitary waves in the swash: a strongly interacting case and a weakly interacting case [J]. *Coastal Engineering*, 2015, 105: 66.
- [44] PULEO J A, KRAFFT D, PINTADO-PATIÑO J C, *et al.* Video-derived near bed and sheet flow sediment particle velocities in dam-break-driven swash [J]. *Coastal Engineering*, 2017, 126: 27.

- [45] DAI H J, KIKKERT G A, CHEN B T, *et al.* Entrained air in bore-driven swash on an impermeable rough slope [J]. *Coastal Engineering*, 2017, 121: 26.
- [46] O'DONOGHUE T, WRIGHT S. Concentrations in oscillatory sheet flow for well sorted and graded sands [J]. *Coastal Engineering*, 2004, 50(3): 117.
- [47] VAN DER A D A, O'DONOGHUE T, RIBBERINK J S. Measurements of sheet flow transport in acceleration-skewed oscillatory flow and comparison with practical formulations [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(3): 331.
- [48] O'DONOGHUE T, POKRAJAC D, HONDEBRINK L J. Laboratory and numerical study of dambreak-generated swash on impermeable slopes [J]. *Coastal Engineering*, 2010, 57(5): 513.
- [49] O'DONOGHUE T, KIKKERT G A, POKRAJAC D, *et al.* Intra-swash hydrodynamics and sediment flux for dambreak swash on coarse-grained beaches [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 112: 113.
- [50] HORIKAWA K, WATANABE A, KATORI S. Sediment transport under sheet flow condition [C]// *Proceedings of the 18th International Conference on Coastal Engineering*. Cape Town: ASCE, 1982: 1335-1352.
- [51] ALSINA J M, PADILLA E M, CÁCERES I. Sediment transport and beach profile evolution induced by bi-chromatic wave groups with different group periods [J]. *Coastal Engineering*, 2016, 114: 325.
- [52] 潘毅, 潘鹏, 刘焯, 等. 基于高速相机测速的冲流带回流过程输沙研究[J]. *水动力学研究与进展: A辑*, 2023, 38(1): 75.  
PAN Yi, PAN Peng, LIU Ye, *et al.* Study on sediment transport in backwash phase of swash processes with high-speed camera velocimetry [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2023, 38(1): 75.
- [53] COWEN E A, MEI SOU I, LIU P L F, *et al.* Particle image velocimetry measurements within a laboratory-generated swash zone [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, 129(10): 1119.
- [54] KIKKERT G A, POKRAJAC D, O'DONOGHUE T, *et al.* Experimental study of bore-driven swash hydrodynamics on permeable rough slopes [J]. *Coastal Engineering*, 2013, 79: 42.
- [55] WU L, FENG D, SHIMOZONO T, *et al.* Laboratory measurements of sediment flux and bed level evolution in the swash zone [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2016, 58(2): 1650004.
- [56] BAKHTYAR R, BARRY D A, LI L, *et al.* Modeling sediment transport in the swash zone: a review [J]. *Ocean Engineering*, 2009, 36(9/10): 767.
- [57] LARSON M, KUBOTA S, ERIKSON L. Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modeling [J]. *Marine Geology*, 2004, 212(1/4): 61.
- [58] NIELSEN P. Shear stress and sediment transport calculations for swash zone modelling [J]. *Coastal Engineering*, 2002, 45(1): 53.
- [59] VAN RIJN L C, TONNON P K, WALSTRA D J R. Numerical modelling of erosion and accretion of plane sloping beaches at different scales [J]. *Coastal Engineering*, 2011, 58(7): 637.
- [60] BALDOCK T E, TORRES-FREYERMUTH A. Numerical study of the flow structure at a swash tip propagating over a rough bed [J]. *Coastal Engineering*, 2020, 161: 103729.
- [61] HU P, XIE J, LI W, *et al.* A RANS numerical study of experimental swash flows and its bed shear stress estimation [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 100: 102145.
- [62] BRIGANTI R, DODD N, INCELLI G, *et al.* Numerical modelling of the flow and bed evolution of a single bore-driven swash event on a coarse sand beach [J]. *Coastal Engineering*, 2018, 142: 62.
- [63] ZHU F, 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.
- [64] 邓斌, 蒋昌波, 杨树清, 等. 冲泻区形态动力学耦合模型研究 I: 分段输沙率公式建立 [J]. *水利学报*, 2018, 49(11): 1409.  
DENG Bin, JIANG Changbo, YANG Shuqing, *et al.* Coupled swash zone hydrodynamics and beach morphodynamics modeling I: segmented sediment transportation model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(11): 1409.
- [65] 邓斌, 蒋昌波, 陈杰, 等. 冲泻区形态动力学耦合模型研究 II: 模型建立与验证 [J]. *水利学报*, 2018, 49(12): 1512.  
DENG Bin, JIANG Changbo, CHEN Jie, *et al.* Coupled swash zone hydrodynamics and beach morphodynamics modeling II: model establishment & validation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(12): 1512.
- [66] HARADA E, IKARI H, KHAYYER A, *et al.* Numerical simulation for swash morphodynamics by DEM-MPS coupling model [J]. *Coastal Engineering Journal*, 2019, 61(1): 2.
- [67] BROCCINI M, DODD N. Nonlinear shallow water equation modeling for coastal engineering [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2008, 134(2): 104.
- [68] ZHU F, DODD N. The morphodynamics of a swash event on an erodible beach [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 762: 110.
- [69] SOULSBY R. *Dynamics of marine sands* [M]. London: Thomas Telford, 1997.
- [70] TAZAKI T, HARADA E, GOTOH H. Vertical sorting process in oscillating water tank using DEM-MPS coupling model [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 165: 103765.
- [71] HU P, TAN L, HE Z. Numerical investigation on the adaptation of dam-break flow-induced bed load transport to the capacity regime over a sloping bed [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 36(6): 1237.
- [72] ZENG J, LIU H. Frictional swash hydrodynamics under the improved seaward boundary condition [J]. *Coastal Engineering*, 2021, 169: 103969.