

波浪作用下非恒定输沙规律

泥沙研究所 王玉海、汤立群

1 学科方向

河口海岸泥沙运动基本理论主要研究在波浪、潮流或者波流共同作用下泥沙的起动、输移、沉降等方面的规律，研究各种海岸工程措施所引起的局部流场的改变和相应的岸滩冲淤调整过程，为工程的优化设计提供技术依据。

由于泥沙运动的复杂性和波浪、潮流动力条件的非恒定性、往复性，再加上径流、风等动力因素的作用，使得河口海岸地区的泥沙输移过程十分复杂，研究的难度很大。同时由于河口海岸地区通常是各国经济比较发达的地带，各类海岸工程建设如火如荼，引起的泥沙问题多种多样，而泥沙问题解决的好坏直接关系到工程建设和运营的安全、效益。因此，各个国家都投入了相当大的研究力量致力于解决各类复杂的泥沙运动基本理论及工程应用等方面的问题。

本项调研主要侧重于国内外针对波浪作用下泥沙的非恒定输沙规律的研究进展，是河口海岸泥沙运动基本理论研究中的一个非常重要，也是难度很大的核心问题。研究该问题对推动河口海岸泥沙学科的发展，对解决各类复杂的海岸工程泥沙问题，实现沿海地区经济、社会、环境的可持续发展等都具有重要的作用和意义。

2 调研背景概述

随着大江大河上游水土保持措施的完善和一系列水库大坝的修建，入海泥沙数量锐减，使得海岸的侵蚀后退越来越成为一种普遍而严重的问题。我国是遭受风暴潮或台风浪频繁侵袭的国家。在风暴潮/浪作用下，海岸地区泥沙活动强烈，岸滩可能发生剧烈的冲淤调整，海岸侵蚀问题尤为严重。

解决海岸侵蚀后退的主要工程措施之一就是进行人工海滩的建设和养护。但是人工海滩堆填的泥沙能否稳定与波浪作用下泥沙的非恒定输移规律密切相关。已有的观察表明（Wright and Short 1984, Lippmann and Holman 1990），风暴潮期间，沿岸沙坝一般会离岸运动，海滩表现为侵蚀性；而常浪期间，沙坝一般会向岸运动，海滩表现为堆积性的。然而，泥沙的输移方向很多时候并不遵循这样的规律，与现场的波浪动力特性、泥沙特性及海滩的地形条件、波流相互作用等

过程密切相关。

因此，研究波浪作用下泥沙的非恒定输沙规律，探究影响泥沙净输移方向的各种动力过程，对正确认识波浪作用下海滩横向剖面的塑造和演化规律，对提高波流共同作用下的动力地貌数值模拟的精度，对人工育滩、海砂开采、疏泥倾倒等海岸工程都具有很重要的指导意义。

本次调研的主要内容包括：

- (1) 国内外对波浪作用下非恒定输沙规律的实验观察和认识；
- (2) 各类半-非恒定输沙率模式的构建。

本次调研材料的主要来源包括国内外专业学术期刊、国内、国际学术会议论文集、国内外博硕士学位论文、有关网站、与专家口头交流等。其中，国内外专业学术期刊包括：《Coastal Engineering》、《Ocean Engineering》、《Journal of Geophysical Research》、《Continental Shelf Research》、《Marine Geology》、《海洋工程》、《泥沙研究》、《水道港口》、《水利水电科技进展》、《水利水运工程学报》、《中国港湾建设》等；国内、国际学术会议论文集包括《第十六届中国海洋（岸）工程学术讨论会论文集》（2013，大连）、《Proceedings of Coastal Dynamics 2013》（法国、阿尔卡雄）、《Proceedings of 35th IAHR World Congress》（2013，成都）及历届《Proceedings of International Conference on Coastal Engineering》等。通过跟踪国内外特别是国外近年来的研究新动向和值得关注点，希望能够对推动本学科在国内的发展和解决相关工程泥沙问题提供借鉴和帮助。

3 近年学科发展新动向和值得关注点

3.1 国内外对波浪作用下非恒定输沙规律的实验研究

波浪的波峰速度通常大于波谷速度，当波峰通过时，泥沙向岸输移，而在波谷时段泥沙离岸输移，但是在一个周期内净输沙却有可能是离岸方向。这一现象得到了一系列往复流水道（oscillatory water tunnel）和大型波浪水槽实验(O'Donoghue and van der A 2012, 王玉海等 2013)及原型观测(Kos'yan et al. 2007)的证实。离岸净输沙与波浪的非恒定输沙过程密切相关，即对应于波浪水质点近底流速的变化，由于泥沙颗粒的起动或/和沉降的延迟，导致在波浪前半个周期内被悬起的泥沙不能及时沉降到床面上而在波浪的下半个周期内向相反方向输移，其结果可能导致一个波浪周期内的净输沙率减小甚至向波浪传播的相反方向（即离岸方向）进行，研究人员将其称之为‘相位滞后’（phase-lag）效应(Dohmen-Janssen 1999)，在沙纹床面和临底高含沙层输沙情形下都可能出现。

下面分别介绍国外学者和国内学者针对泥沙的非恒定输移规律开展的实验研究和取得的成果。

3.1.1 国外学者开展的非恒定输沙实验

对于波浪（流）作用下泥沙非恒定输移特征的认识离不开实验研究。通过精心控制的波浪动力条件和实验用沙（粒径、级配等），国外学者开展了大量的室内输沙实验研究，取得了丰富的成果。

Watanabe 等（1990）最早在实验中观察到了相位滞后效应。他们于 1990 年在东京大学往复流水道中所做的沙纹床面输沙实验中观察到在一定的条件下，泥沙会向波浪前进的反方向输移。

对于临底高含沙层输沙而言，Dibajnia 等（1992）利用中值粒径 0.2mm 的天然沙和非对称波浪+恒定流所进行的往复流水道输沙实验表明，由于波浪连续半个周期内泥沙输移相互依赖，其结果是准恒定流输沙公式难以准确预测净输沙率的大小和方向。在 Ribberink 等（1993）往复流水道实验中，使用中值粒径 0.13mm 的天然沙和 Stokes 二阶非对称波，发现当波浪轨道（orbital）速度的均方根值大于 0.7m/s 时，净输沙就向波浪传播相反的方向输移。在 Janssen 等（1996）往复流水道实验中，使用中值粒径 0.13mm 的天然沙和正弦波+恒定流，发现净输沙率随着波浪周期的减小而减少，但是在相同的动力条件下，细沙的净输沙率要小于较粗粒径泥沙（0.21mm、0.32mm）的净输沙率。

O'Donoghue 和 Wright(2004)在 Aberdeen 大学往复流水道中利用斯托克斯二阶非对称波和中值粒径 0.15mm 的细沙输沙实验中，观察到虽然波谷时刻最大的离岸流速（ $t/T=0.72$ ）大约只是波峰时刻最大向岸流速($t/T=0.21$)的 60%，但是泥沙通量（流速乘以悬沙浓度沿水深积分）却几乎相等（图 3-1），作者将此归结为相位滞后效应的影响，即在最大向岸流速时刻被悬扬的泥沙不能及时沉降而是保持悬浮在波谷时刻继续输移。

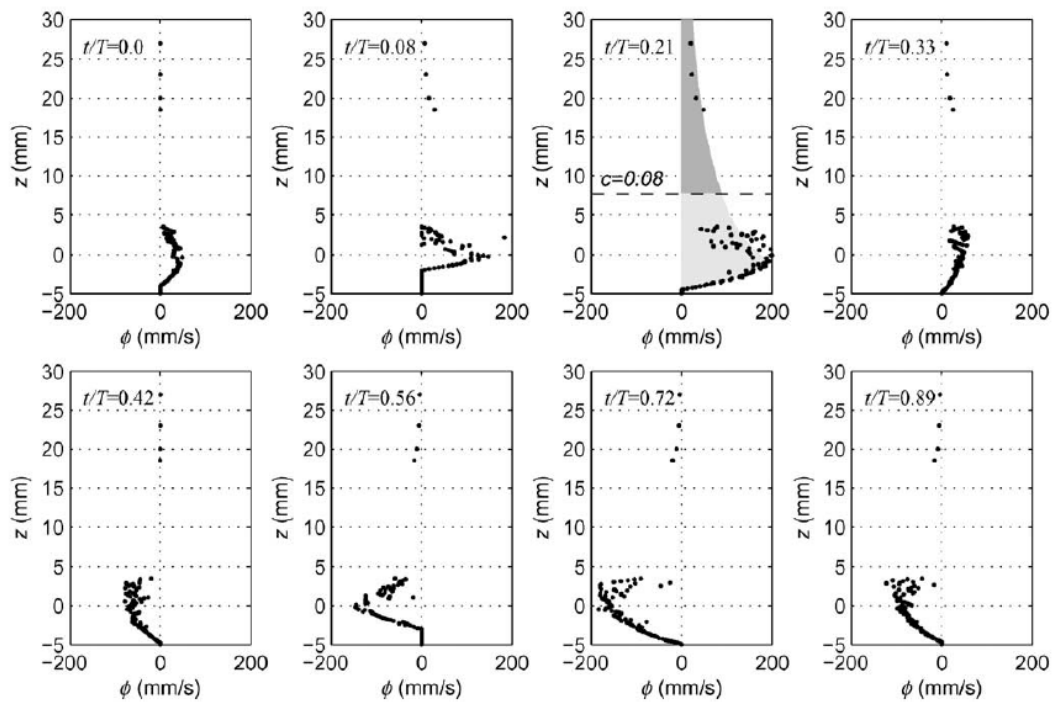


图 3-1 一个波浪周期内不同相位时刻泥沙通量的分布。纵坐标是距床面高度，横坐标是输沙通量，正值表示向岸，负值表示离岸， $t/T=0.21$ 接近波峰时刻， $t/T=0.72$ 接近波谷时刻（取自 O'Donoghue and Wright 2004）

Lamb 等(2004)利用往复流水道专门开展了粉沙 ($D_{50}=0.026\text{mm}$) 的试验研究，注意到临底高含沙层(图 3-2)的存在导致波浪边界层厚度显著减小，并且可能改变紊流动能的产生与耗散，使得其在整个水深范围内的分布发生变化。



图 3-2 U 型往复流水道中的临底高含沙层(图中 HDS 所指)输移现象(取自 Lamb 等 2004)

上世纪九十年代输沙实验使用较多的是 U 型往复水道，但认识到往复水道中水流特征与波浪水槽中的水流特征有较大的差别，由此造成在相同的波浪动力和泥沙条件下二者的净输沙率却不同 (Dohmen-Janssen and Hanes 2002, Nielsen and Callaghan 2003); 此外，小型波浪水槽输沙实验中不可避免地存在比尺效应 (王玉海等 2012)。为了克服比尺效应给实验结果带来的误差，近年来国外研究人员越来越多地在能够产生原型尺度的大型波浪水槽中开展实验研究。

表 3-1 列举了国外现有的大型波浪水槽，而我国目前仅天津水运工程科学研究院在天津临港经济区建设了一座长 450m、宽 5m、深 12m 的大型波浪水槽，该水槽能够产生最大 3.5m 波高的波浪，2013 年底建成。

表 3-1 世界上的大型波浪水槽 (单位: m)

所在地	长	宽	高	H_{max}	T(s)	备注
天津水运工程科学研究院	450	5.0	12.0	3.5	2-10	预计 2013 年底建成
德国汉诺威海岸研究中心	300	5.0	7.0	2.5	2~15	具有主动吸收反射波的能力，建成于 1983 年，总功率 900kW
Delta 水工所新波浪水槽	300	5.0	9.5	4.0		2012 年 9 月 12 日开工建设，预计 2013 年 11 月建成以替代原来的水槽
荷兰 Delta 水工所	240	5.0	7.0	2.5	3-12	具有主动吸收反射波的能力，于 1980 年投入使用，总功率 675kW
台湾国立成功大学水力实验室	300	5.0	5.0	1.5		具有主动吸收反射波能力，
日本电力工业中央研究院 (CRIEPI's)	205	3.4	6.0	2.0	3~20	具有主动吸收反射波的能力，总功率 740kW
台湾国立成功大学水力实验室	200	2.0	3.0	0.6		具有主动吸收反射波能力，部分玻璃边墙
日本港湾空港技术研究所	185	3.5	11.0	3.5	/	/
俄罗斯圣匹兹堡州立理工大学水力学研究所	110	4.0	7.5	2.0	/	/
日本港湾空港技术研究所	105	3.0	2.5	0.8	0.5-10	主动吸收反射波的能力，部分玻璃边壁
美国俄勒冈州立大学 O.H. Hinsdale 波浪研究实验室	104	3.7	4.6	1.6	0.5-10	具有主动吸收反射波的能力，建成于 1973 年
西班牙 Catalonia 理工大学海洋工程实验室	100	3.0	5.0	1.6	/	具有主动吸收反射波的能力
加拿大国家研究委员会水力学研究中心	97	2.75	2.0	1.25	/	具有主动吸收反射波的能力

注: H_{max} 表示最大波高, T 表示周期, 数据均来自各相关网站及文献[2], 恕不一一列出, ‘/’ 表示资料不详。

借助于先进的高精度的水流和悬沙浓度量测仪器, 国外特别是荷兰、德国等国家的学者在能

够产生原型尺度波浪的大型波浪水槽中开展了一系列针对波浪边界层内的水流结构、悬沙浓度剖面在一个波浪周期内、一个沙纹波长内的变化过程、垂向分布结构以及净输沙率的实验研究，为正确认识波浪边界层非恒定输沙机理提供了丰富的观测资料。

Dohmen-Janssen 等（2005）在德国汉诺威大型波浪水槽（图 3-3）中量取了非规则、非破碎波群作用下粗沙（0.24mm）临底高含沙层输沙时泥沙浓度、近底流速（ $z=0.1\text{m}$ ）、颗粒运动速度等，由于是粗沙，临底高含沙层内颗粒的浓度与波浪边界层外缘水流速度之间几乎没有相位滞后，而水体上部悬沙层内颗粒的浓度则与水流速度之间存在着明显的相位滞后现象。



图 3-3 德国汉诺威大型波浪水槽（取自 Schretlen et al. 2008）

Davies 和 Thorne（2005）介绍了在 Delft 大型波浪水槽中利用声学后向散射浓度计（ABS）所测量的波浪边界层内悬沙浓度，在一个沙纹波长内和一个波浪周期变化的结果（图 3-4），指出随着高度的增加悬沙浓度与水流流速之间相位滞后逐渐增加，但是用传统的紊流扩散理论（turbulent diffusion）并不能很好地刻画，可能需要引入对流传输（convection）机制。

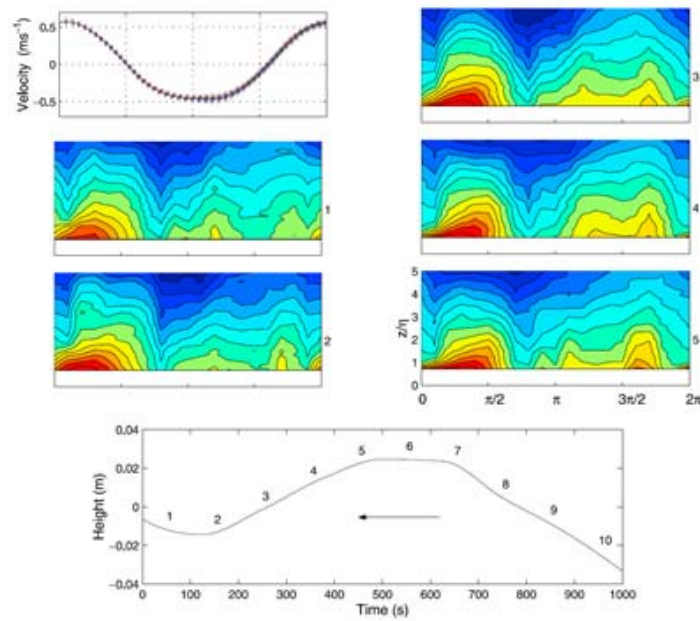


图 3-4 沙纹床面下悬沙浓度的时空变化（取自 Davies and Thorne 2005）

利用原型尺度的波浪水槽进行物理模型实验具有很多优点。由于水槽是二维问题，不仅简化了水下地形和水动力场在沿岸方向上的变化，能够保证泥沙的物质守恒（不会从侧边界逸出）；而且波浪动力可控、易重复，地形容易测量；一个更重要的优点是大大减少了小尺度模型无法避免的比尺效应对实验结果所造成的误差。

但是，由于这类大型波浪水槽及量测仪器、数据采集系统等不仅建造、安装成本巨大，其运行、维护及实验的直接成本也很高昂，这些都是单个研究人员、单个小型研究课题所不能负担的，同时，由于实验所研究的近岸地区波浪动力、泥沙输移及岸滩演变等过程复杂，需要众多研究人员共同参与，分专题、分小组来完成，因此，大型国际、国内合作研究计划（项目）便应运而生，得到了各国科技机构包括国际组织的大力支持。

较早利用大型波浪水槽开展的合作研究计划是 SUPERTANK 项目(Kraus et al. 1992)于 1991 夏天在美国俄勒冈州立大学 O.H. Hinsdale 波浪研究实验室水槽（表 3-1）中进行，该项目由美国陆军工程师团海岸研究中心（CERC）、俄勒冈州立大学等在内的 14 家大学、研究机构、公司以及部分外国学者共同参与，使用的测量仪器包括 16 支电阻式浪高仪、10 支电容式浪高仪、18 部二维电磁流速仪、34 支 OBS、10 支孔隙压压力计、3 支 ABS，1 台声学多普勒流速剖面仪（ADVP）、1 台激光多普勒流速仪（LDV）、5 部摄像机、2 部水下摄像机等；实验主要围绕近岸波浪动力、泥沙横向输移和海滩剖面变化等 3 个专题进行的，除了少数实验观察了破波作用下的泥沙悬浮过程和边界层过程，大部分尚未涉及破波紊动特征和边界层动力特征。

1993 年 LIP-11-D-Delta Flume Project 在荷兰代尔夫特大型波浪水槽中进行,集中观测了长波的作用和近底水沙过程。1996 年研究人员在日本电力工业中央研究院 (CRIEPI) 波浪水槽 (表 3-1) 进行了一系列实验来研究随机波及低频波动对悬沙输移和岸滩演变的过程 (Shimizu and Ikeno 1996)。

1999 年 SISTEX99 (Small-scale International Sediment Transport Experiment) 计划在德国汉诺威大型波浪水槽中 (表 3-1) 进行,波浪条件包括规则波、波群、随机波,近底流速测量采用 ADV,悬沙浓度测量采用 ABS,床面形态测量采用声学沙纹剖面仪 (Thorne and Hanes 2002),其目标是详细地观测波浪引发的紊动特征、沙纹床面和临底高含沙层泥沙悬浮、输移过程等;重点观测波群作用下沙纹床面的泥沙悬浮过程,以了解悬沙浓度变化的时间累积效应,可以清楚地观察到在波群的初始阶段,悬沙浓度开始增长,而在波群结束阶段悬沙浓度开始下降 (Vincent et al. 2001)。

2005 年夏天在美国俄勒冈州立大学 O.H. Hinsdale 波浪研究实验室水槽进行了 CROSSTEX (The Cross-shore Sediment Transport Experiment) 合作实验研究。这是一项由来自 10 家大学、研究所的 12 位主要研究人员共同参与的近岸地区横向输沙实验,包括 4 个专题: 1) 波浪边界层与沙纹相互作用 (非破碎波); 2) 波浪破碎与泥沙悬浮; 3) 沙坝运动; 4) 波浪冲流带 (Swash zone) 过程。其目标是通过研究波浪作用下的横向输沙机理来更好地为提高岸滩演变数值模拟的精度服务。借助先进的量测仪器,实验人员详细地观察了横跨外破波带到冲浪带 (surf zone) 再到冲流带,从泥沙颗粒的输移到沙坝的不同时空尺度的岸滩演化过程,整个计划于 2008 年结束 (Maddux et al. 2006)。

SANTOSS (SAND Transport in Oscillatory flows in the Sheet-flow regime) 是荷兰特温特大学和英国 Aberdeen 大学的合作研究计划,起止日期 2006-2010 年,其目标是在广泛收集已有的大型往复水道和波浪水槽临底高含沙层输沙数据的基础上,针对临底高含沙层内流速分布、波浪边界层的加速度偏斜、波浪边界层余流 (streaming)、水质点的垂向运动等在代尔夫特大型波浪水槽 (表 3-1) 开展必要的输沙实验,依据这些输沙实验数据,建立一个‘半经验’的临底高含沙层净输沙率的计算公式,并将其应用于床面变形数值模式中;该输沙率公式适用于非破碎波、波流共同作用、宽级配、沙纹床面和临底高含沙层输沙模式,尝试刻画了相位滞后效应、波浪非线性特征 (速度偏斜和加速度偏斜)、边界层余流和水质点的垂向运动、拉格朗日漂移等过程 (Nomden 2001)。

欧洲基础实验设施网络计划 HYDRALAB 是一项由欧盟提供资助,支持欧盟范围内的研究人

员到相关大型实验室开展研究的专门计划。第一阶段的 HYDRALAB I 开始于 1997 年，最初由包括代尔夫特水工所、DHI、HR Wallingford 等 8 家大学和研究机构参与，各成员都将自己实验室的设备及技术参数在网上公布，欧盟范围内任何一个国家的研究人员都可根据自己的专业和研究目标自主申报实验研究课题，经专门的用户遴选委员会审核批准后，就可得到欧盟的资助并赴相关实验室开展实验研究，而相关实验室也会得到欧盟的资金支持，用于实验室设备的维护、保养和更新改造等工作。HYDRALAB I 于 2000 年结束。随后进行了 HYDRALAB II (2000-2004)，成员单位增加到 15 家。在 2002 年欧盟进一步提出了基础设施一体化的倡议，并在 HTDRALAB III 中得到了积极的贯彻 (van Os 2003)。

HYDROLAB III 是由欧盟投资 1180 万欧元，欧盟范围的 28 家大学和研究机构参加的网络化组织，为欧盟范围内的研究人员提供进入包括水力学、地球物理流体力学、船舶动力学和冰工程等在内的 20 项试验设施进行试验研究提供资助。HYDROLAB III 从 2006 年 4 月 1 日开始到 2012 年 3 月 31 日结束。计划实施以来，已经就波浪、结构物、泥沙、物理海洋学、船舶动力学、冰工程、水生植物的水力学特性等方面开展了实质性的研究，培训了大批年轻而有创新思想的试验研究人员，发表了一批关于波浪、防波堤、生态、泥沙、物模与数模综合模拟等实验方法的导则和规范，推动了新的实验量测仪器、数据采集与处理系统和综合模拟方法的发展，也促进了对模型实验在环境水力学研究的角色和价值的讨论 (van Steeg and van Schijndel 2010)。

HYDROLAB III 的特点是网络化、跨边界、联合研究，其核心宗旨是在欧盟范围提供大型实验设施的共享、提高其使用效率和效益、推动实验方法论特别是包括物理模型实验、理论分析、数值模拟和现场观测等在内的综合研究方法论的发展。欧盟为研究人员到其中的实验室开展研究提供实验费用、差旅费和生活补助 (Caceres et al. 2009)。

在 HYDRALAB III 合作研究项目中，值得一提的是动床模型实验的比尺、分析及新型仪器装备专题 SANDS (Scaling and Analysis and New instrumentation for Dynamic bed Test S)。该专题重点研究动床模型实验的比尺效应以及采用新的光学、声学量测仪器来测量边界层动力特征及泥沙输移过程等。为了研究缩尺模型的比尺效应，专门进行了系列模型实验，例如，Caceres 等^[27]介绍了分别在德国汉诺威、西班牙和代尔夫特 3 座大型波浪水槽 (表 3-1) 中做的系列比尺的动床模型试验，以汉诺威作为原型，西班牙 1:1.9，代尔夫特 1: 6，相应的波要素、泥沙粒径、波浪作用时间等均按照相应的 Froude 相似和几何相似来确定。试验结果表明，汉诺威和西班牙的结果具有可比性，以推移质输沙模式为主，而代尔夫特实验中泥沙 0.134mm 较细，以悬沙输移为主，因而床面演化形态不具有可比性；另外汉诺威和西班牙水槽中悬沙浓度分布与波高、流

速等参数不具有相关性，原因可能与破波沙坝有关。

Caceres 等（2009）特别指出，动床模型试验遵循的 Froude 相似律并不能正确模拟床面切应力，因而会扭曲波浪的边界层和相应的床面演化，Froude 相似律也不能考虑紊动、弹性、气泡含量等均会导致试验结果的不确定性；因此，在设计动床模型试验时必须要保证输沙模式的相似性。

另外一个值得一提的合作研究专题是海滩与结构物相互作用的复合模拟技术 CoMIBBS（Composite Modelling of the Interaction Between Beaches and Structures），其目的是通过物理模型实验、数值模拟、理论分析和现场观测技术来研究海床-动力-结构物相互作用方面的专题，提出包含物理模拟和数值模拟在内的综合模拟技术，做到二者优势互补，合理使用，提高研究成果的质量和可靠度。项目的总结见（Gerritsen et al. 2009）。

目前正在进行的是 HYDRALAB IV，由欧盟投资 850 万欧元，从 2010 年 10 月 1 日始到 2014 年 9 月 31 日结束，由来自 15 个欧盟成员国的 22 家大学和科研机构正式成员和 8 家伙伴单位参加，包括 4 个专题：1. 结构物的水力响应，旨在提高对海岸和深海结构物对波浪荷载的预测能力；2. 水力与生态相结合的模型实验方法及仪器装备，其目标是发展创新性的方法将动物、植物等生物要素结合进水力模型实验中；3. 水-界面-泥沙实验，进一步改进声学-光学测量技术，提高波流边界层内流速、紊动、泥沙悬浮与输移的二维、三维观测技术和能力；4. 实验及数据的远程访问，通过发展新的数据采集、维护和通讯技术，使得研究人员可以通过遥控方式、实时进入 HYDRALAB IV 资助的实验研究中，另外，实现实验数据能够直接被研究群体所共享（European Union 2012）。

3.1.2 国内学者开展的实验研究

为了解决在粉沙质海岸建港过程中遇到的骤淤难题和了解粉沙的输移特性，国内学者对粉沙进行了较多的实验研究。赵冲久（1994）利用波浪水槽对潍坊粉沙（ $D_{50}=0.081\text{mm}$ ）进行了高浓度含沙水体的输沙试验研究。赵冲久等（2003）又进一步研究了波浪作用下全水深（黄骅粉沙 $D_{50}=0.036\text{mm}$ ，潍坊粉沙 $D_{50}=0.073\text{mm}$ ）悬移质粉沙的垂线浓度分布规律，对底部高浓度含沙层的厚度、平均流速和含沙量分布等进行了探讨。赵冲久等（2005）假设水流在形成高含沙层前后的总动量不变，探讨了计算底部高浓度含沙水体的流速，尝试通过 uch （ u 是高浓度含沙水体的流速、 c 是其垂线平均浓度、 h 是其厚度）的途径得到计算底部高浓度含沙层输沙率的公式。在赵冲久等^[31]工作的基础上，杨华等（2006）进行了波流共同作用下的水槽输沙试验和现场监测，并利用泥沙垂向一维扩散方程导出了半理论半经验的波流共同作用下的粉沙垂线浓度分

布公式。

另一方面,国内学者注意到粉沙在其输移过程中既有悬移运动又有推移运动,二者均占有相当的比重,不可偏废(赵冲久 1994, 韩西军 1994);曹祖德、焦桂英(2002)探讨了不同粒径和综合流速作用下粉沙输移过程中和航道淤积中推悬比确定的问题;曹祖德等(2004)则进一步基于推悬比概念探讨了粉沙输沙率的计算公式。

但是国内学者较少注意到波浪作用下粉沙运动所具有的相位滞后效应和该效应所导致的净输沙在幅度和方向上的变化,对粉沙临底高含沙层的输沙规律还缺乏深入的研究;由于缺少大型波浪和往复水道实验设施,所进行的试验研究也主要是中、低强度的波浪动力条件下床面发育沙纹时的输沙试验;同时,由于试验设备和量测仪器的限制,国内学者在输沙试验中往往得出过大的临底高含沙层的厚度值和偏小的垂线平均含沙量数值。

3.2 各类非-恒定输沙率计算模式的构建

对于海岸地区波浪作用下泥沙净输沙率的预测、计算,一直是海岸工程泥沙界的研究热点问题之一。经典的准恒定流输沙率计算公式,如(Madsen and Grant 1976, Bailard 1981, Ribberink 1998),对于计算中值粒径大于 0.2mm 的中、粗沙的输沙率,无论是大小和方向都有着比较高的精确度,因为这类泥沙输移过程中多集中于床面附近的一个薄层内,此时,泥沙颗粒的沉速大,沉降时间相对于波浪半周期而言要小得多,泥沙的输移能够对近底流速或者床面切应力的变化做出迅速的反应。

但是对于有大量泥沙悬扬的情形,如床面发育沙纹、波浪破碎或者临底高含沙层输沙过程,尤其是细沙、粉沙输沙过程,由于泥沙颗粒的起动或/和沉降延迟,导致在波浪前半个周期内被悬起的泥沙不能及时沉降到床面上而在波浪的下半个周期内向相反方向输移,反之亦然,其结果可能导致一个波浪周期内的净输沙率减小甚至向波浪传播的相反方向(即离岸方向)进行。这种非恒定输沙过程(相位滞后效应)用准恒定流输沙公式就很难准确计算净输沙率的大小和方向,有必要提出新的输沙模式。对此,国外学者做了大量的探索工作,提出了一系列半非恒定的(semi-unsteady)经验公式,比较有代表性的有 Nielsen 公式(1988)、Dohmen-Janssen 公式(1999)、Dibajnia 和 Watanabe 公式(1992)以及随后的一系列修正公式(Dibajnia et al. 2001, Watanabe and Sato 2004, Silva et al. 2006, Camenen and Larson 2006, Dong et al. 2013, van der A et al. 2013)等。

国内学者为了提高预测粉沙质海岸航道泥沙淤积计算的精度,也进行了多种尝试。刘家驹(2004)基于悬沙落淤的模式从提高破波作用下水体含沙量的角度修正了原用于淤泥质海岸港池

回淤计算的公式，罗肇森等（2007）则从风、浪、流联合作用下底沙输移的角度出发修正了原用于计算沙质海岸输沙率的公式。

在床面发育沙纹时，在波峰转波谷和波谷转波峰的转流时刻，在沙纹的背流面由于漩涡的散发会将大量的泥沙悬浮到水体中。基于这一物理图景，Nielsen（1988）提出了一个简单的“抓-倒”（grab-dump）的输沙模式，即在每个半周期内转流时刻当漩涡散发时泥沙被悬扬，然后向相反方向输移一定距离后沉降下来；通过分别计算波峰和波谷半周期内输移的泥沙数量再通过二者相减得到一个周期内的净输沙率。应用该公式的一个难点在于如何确定悬沙在波峰半周期和波谷半周期内输移的距离。

Dibajnia 等（1992）同样提出利用半周期分割的模式来计算一个波浪周期内的净输沙率。为了反映泥沙在前后半个周期内的交换关系，他们分别计算波浪在前后半个周期内各自悬扬的泥沙数量，实际输移的泥沙和保持悬浮状态直到下半个周期内被输移的泥沙数量来构建输沙模型（简称 DW92 模式，下同）。相位滞后效应用一个参数 ω_i 来刻画，其计算公式为：

$$\omega_i = \frac{T_{\text{fall}}}{T_i} = \frac{\Delta_s / \omega_s}{T_i} = \frac{1}{2} \frac{u_i^2}{(s-1)gT_i\omega_s} \quad (3-1)$$

该参数表示在半周期内颗粒沉降时间 T_{fall} 与半周期 T_i 的比，其中 Δ_s 代表颗粒的悬浮高度，假定颗粒的紊动动能全部转换成势能，没有考虑紊动动能的耗散， g 是重力加速度， s 是泥沙颗粒密度与水流密度之比，下角标 ‘i’ 分别表示波峰半周期（c）和波谷半周期（t）， u_i 是半周期内波浪轨道速度的振幅， ω_s 是颗粒的沉速。当 ω_i 超过一个临界值时，在该半周期内悬浮的部分泥沙就会一直保持悬浮状态直到下一个半周期内。显然，轨道速度越大、颗粒粒径越细、波浪周期越小， ω_i 就会越大。

波浪轨道加速度偏斜表示从波谷加速到波峰所用的时间比从波峰减速到波谷所用的时间要短。为了反映波浪轨道加速度偏斜和颗粒的临界起动对净输沙率的影响，Dibajnia 等（2001）利用颗粒的可动性参数（mobility number）重新修正了 DW92 模式中的相位滞后效应参数及输沙率计算公式。Watanabe 等（2004）进一步改进了波浪轨道加速度偏斜对 DW92 模式中有关计算参数的影响。

Silva 等（2006）指出 DW92 模式能够考虑相位滞后效应的作用，但是却不能正确计算该效应引起的净输沙率的增大或者减小量以及离岸方向的净输沙率，原因在于计算相位滞后参数时对沙

纹床面或者临底高含沙层输沙过程中颗粒悬浮高度和临底高含沙层条件下颗粒沉速的计算不准确,而后者需要考虑延迟沉降效应(hindered settling effect);同时,DW92模式计算的输沙率采用波浪半周期轨道流速的3次方,因而对流速和水深都有依赖,影响计算精度,也不能准确反映波浪加速度偏斜的影响,特别是在单纯恒定流或者强流+弱波作用下,该公式的计算值会出现间断。针对这些不足,Silva等(2006)进一步修正了DW92模式。但是Silva修正公式并没有明确给出计算颗粒悬浮高度和沉降延迟效应的计算方法,而是代之以用无量纲希尔兹参数来隐式地反映。

为了更好的反映波浪非对称性(包括速度偏斜和加速度偏斜)、波浪边界层余流和水质点的垂向流速、波流夹角等动力因素对净输沙率的影响,van der A等(2013)进一步修正了DW92模式。不同于Silva修正公式(2006),van der A等(2013)明确了颗粒悬浮高度的计算公式:对于沙纹床面,颗粒的悬浮高度等于数倍的沙纹波高,对于临底高含沙层输沙则数倍于临底高含沙层的厚度,具体的倍数需要用实验数据来率定;对于颗粒的延迟沉降,van der A等(2013)利用水质点的垂向流速进行了修正。

van der A模式能够计算波浪边界层内推移质+悬沙净输沙率的大小和方向,能够计算Schretlen等(2008)在大型波浪水槽中观察到的细沙在加速度偏斜波作用下向岸净输移的现象,但是向岸净输移的实验现象究竟是‘真实的’还是由实验设备造成的,在天然现场情形如何,还需要进一步论证。

Dong等(2013)则假定颗粒的悬扬高度就等于临底高含沙层的厚度,并给出了相应的计算方法,考虑了水流叠加强对波浪半周期的影响,考虑了高浓度颗粒的阻碍沉降和波浪加速度偏斜的影响,再次基于DW92模式提出了新的修正公式。

Dong等(2013)对公式计算结果和大量往复流水道及波浪水槽试验观测资料的对比表明,Dibajnia等修正公式(2001)的预测能力是最差的,而Watanabe等修正公式(2004)中虽然引入了加速度偏斜因子,但是对于大部分单纯的加速度偏斜波作用下的净输沙率预测偏差也是较大的;对于单纯速度偏斜波作用下中粗沙的净输沙率预测是较好的,但是对于细沙效果就较差,原因是由于相位滞后效应的作用,净输沙是离岸方向的,而Watanabe等修正公式(2004)预测的结果却是向岸的;同时该模式在计算颗粒的悬浮高度(对所有粒径的颗粒计算的高度都一样)和相位滞后效应参数 ω 计算的偏差都导致该公式在预测有强流叠加作用时的全沙的输沙率偏小。

由于重新定义了颗粒悬浮的高度,Dong等公式(2013)对细沙和单纯波浪作用下的净输沙率的预测能力显著改善,对于粗沙输沙而言,该模式对单纯波浪作用和叠加强流作用时的净输沙

率的幅度和方向的预测能力都较好，但是该模式似乎仍然低估了某些细沙净输沙率试验的观测值。

另一方面，Dohmen-Janssen (1999)、Camenen 等 (2006) 则直接利用相位滞后效应参数对希尔兹参数类型的准恒定输沙率公式进行修正，以反映净输沙率的变化。但是 Dohmen-Janssen 公式 (1999) 只能计算出相位滞后效应所导致的向岸输沙率的减少而不能计算离岸方向的净输沙率，Camenen 等公式 (2006) 能够计算离岸方向的净输沙率，但是由于未能刻画波浪前后半个周期内的泥沙交换过程，公式的计算精度还是比较有限的。

总之，泥沙输移过程中的‘相位滞后’效应，影响着波浪前、后半个周期的泥沙交换过程，其本质是在波浪前半个周期内被悬浮的部分泥沙不能在该半周期内及时沉降而是保持悬浮直至下半个周期内向相反方向继续输移沉降的过程。该过程需要用参数来刻画，普遍的做法是将其处理为悬浮颗粒沉降历时与波浪半周期内可供沉降时段的比值。因此，影响相位滞后效应的因素主要包括颗粒的沉速和颗粒被悬扬的高度，而波浪的一些主要动力特征，如波形非对称性（速度偏斜、加速度偏斜）、边界层余流、水质点的垂向运动等会影响到这二者以及颗粒的沉降历时，国外学者对相位滞后效应参数的一系列修正也主要集中在这些方面（王玉海等 2013）。

但是现有的工作对于颗粒的沉降历时尚未能准确把握，而沉降历时取决于一个给定粒径的颗粒在一个波浪半周期内何时沉降、沉速大小等条件，与波浪边界层内的水平流速、垂向流速的变化过程密切相关；此外，现有的工作对于颗粒的起动延迟在相位滞后效应参数中的体现和贡献较少涉及，个别学者只是简单地引入颗粒的临界起动希尔兹参数来有所反应。

目前，半周期的半-非恒定输沙模式得到了越来越多学者的认同，但是对于强流+弱波的情形，此时波谷半周期可能消失，现有的各类半周期输沙模式就不能适用；另外，现有的各类半周期输沙模型都假定悬浮颗粒在波峰、波谷两个半周期内得到全部沉降，对于部分悬浮颗粒经历连续两个半周期仍未能沉降的输沙情形就不适用。

已有的各类半-非恒定模式计算的都是波浪边界层内全沙的净输沙率，引入的相位滞后效应参数会影响全沙的输沙过程，但实际上，该效应影响的只是边界层内悬沙的输移过程，对于推移质而言需要采用准恒定输沙公式进行计算才更准确。

由于上述这些问题的存在和对波浪边界层输沙过程中其它一些关键机理缺乏清晰的认识，导致现有的计算沙纹床面或是临底高含沙层净输沙率的半-非恒定公式中都有一个或几个率定系数，需要借助于实验观测数据进行率定，不仅造成计算精度存在着较大误差，而且也限制了应用范围。

4 结论与建议

近岸地区波浪的各种动力特征，如波形非对称性（包括速度偏斜和加速度偏斜）、边界层余流、水质点的垂向运动、轨道速度的水平梯度等动力过程都与泥沙的相位滞后效应密切相关，它们共同作用，从而决定了波浪的非恒定输沙过程及净输沙率的大小和方向。

计算波浪（流）作用下的净输沙率模式，需要能够捕捉上述这些主要的动力过程，能够准确刻画由相位滞后效应所引发的非恒定输沙过程。只有这样，才能准确地计算波浪净输沙率的大小和方向，才能更好地预测不同波浪动力环境下泥沙横向输移与海滩均衡剖面的塑造过程，为人工育滩、海砂开采、港池航道防淤减淤等各类海岸工程提供可靠技术支撑。

在今后的研究工作中，还需要更深入地研究不同波况（包括波浪破碎、长波、波流相互作用等）下颗粒的起动延迟和/或沉降延迟造成的非恒定输沙过程的动力机制，准确刻画泥沙在波浪前后多个半周期内的交换关系并将其反映在净输沙率的计算公式中；此外，对非均匀沙的非恒定输沙过程（包括垂向分选等）的刻画并构建相应的净输沙率计算模式将是今后较长一段时间内国内外学者需要致力研究的重要课题^[50]。

与此同时，在接近原型尺度的波浪水槽中开展泥沙实验可以有效避免小尺度模型的比尺效应问题，可以更真实、更准确地模拟极端波况条件下的水动力场、泥沙起动与输移、结构物荷载等；特别是借助高分辨率的量测仪器，如 ABS、OBS、ADVP 等，在接近原型尺度的波浪水槽输沙实验中，能够直接观测波浪边界层内的流动特征、泥沙起动与悬浮、悬沙浓度剖面、沙纹床面及临底高含沙层内的非恒定输沙过程，对于推动海岸泥沙基本理论的发展具有重要作用。可以预见，在未来数十年内大型波浪水槽将继续在研究近岸地区波浪作用下的输沙机理及岸滩剖面演化过程以及其它水动力与结构物相互作用等方面扮演重要的角色（王玉海等 2013）。

但是大型实验设施包括相关的量测仪器、数据采集和后期处理软件等不仅建造成本巨大，而且运行、维护及实验的直接成本也很高昂，是单个研究人员、小型研究课题所无法承担的。通过巨额投资建设一个实验室相对容易，但是建成后如果得不到精心的维护、没有持续的实验项目支撑，可能很快就会荒废。因此，如何最大限度地发挥大型实验设施的使用效率和效益，真正实现这类设施的开放、合作、共享，是摆在政府、科研机构、企业和研究人员面前的一个严肃课题。对此，国际上一些成熟的经验和做法或许可以给我们一些借鉴。

5 对我院本学科（水利水电行业）发展的建议，未来发展思路和新兴增长点

研究泥沙输移基本理论并尝试解决相关的工程泥沙问题是国内外水利工程领域泥沙工作者的一个重要业务。但是国内的研究力量多集中于传统的水库泥沙及河道输沙等方面，研究河口海岸地区泥沙输移基本理论及工程应用的力量不仅分散，研究手段和研究成果较国外同行都有较大的差距。这种现状与我国作为一个海洋大国，拥有 18000 公里各种类型的海岸线和为数众多的河口、滩涂、岛屿等资源，与沿海地区经济繁荣活跃，工程泥沙问题多种多样的国情十分不符。

由于大江大河上不断修建的大型水库大坝的拦蓄作用和流域水土保持等措施的实施，入海泥沙的数量逐年减少，再加上海平面上升、风暴潮加剧等自然因素和不合理的海岸工程建设、海岸湿地植被和防护林破坏等人为因素的影响，造成海岸侵蚀后退十分普遍，有些岸段还相当严重，给当地的工农业生产和的物质财产造成了严重的损失。

可以预见海岸防护将是我国今后较长一段时间内面临和需要着重解决的问题，也是水利部门的一项重要任务。海岸防护不仅涉及到一系列工程措施，如建设海堤、护岸、丁坝、潜堤等，也涉及到一系列复杂的泥沙问题，如人工育滩的稳定性、经济效益和海堤堤前冲刷等问题。因此，需要重视和加强同海岸防护相关的泥沙基本理论的研究，为实施海岸带生态修复与整治工程和海岸带一体化综合管理提供可靠的技术支撑，为保障和促进沿海地区经济、社会和环境、资源的可持续发展服务。

参考文献

- 1 Bailard, J.A. An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach. *Journal of Geophysical Research*, 1981,86 (C11):10938–10954.
- 2 Caceres, I., Alsina, J.M., Sanchez-Arcilla, A. Mobile experiment focused to study the swash zone evolution. *Journal of Coastal Research*, special issue, 2009, 56:1736-1740.
- 3 Camenen, B., Larson, M. Phase-lag effects in sheet flow transport. *Coastal Engineering*, 2006, 53: 531-542.
- 4 Davies, A.G., Thorne, P.D. Modeling and measurement of sediment transport by waves in the vortex ripple regime. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, C05017.
- 5 Dibajnia, M., Watanabe, A. Sheet flow under nonlinear waves and currents. *Proceedings of the 23rd*

- International Conference on Coastal Engineering, Venice Italy, 1992:2015-2028.
- 6 Dibajnia, M., Moriya, T., Watanabe, A. A representative wave model for estimation of nearshore local transport rate. *Coastal Engineering Japan, JSCE*, 2001, 43(1): 1-38.
 - 7 Dohmen-Janssen, C.M.. Grain size influence on sediment transport in oscillatory sheet flow: Phase lags and mobile bed effects. PhD Thesis, Delft: Delft University of Technology, 1999.
 - 8 Dohmen-Janssen, C.M., Hanes, D.M. Sheet flow dynamics under monochromatic non-breaking waves. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(C10):1301-1321.
 - 9 Dohmen-Janssen, M., Hanes, D.M. Sheet flow and suspended sediment due to wave groups in a large wave flume. *Continental Shelf Research*, 2005, 25(3): 333-347.
 - 10 Dong, L.P., Sato, S., Liu, H. A sheetflow sediment transport model for skewed-asymmetric waves combined with strong opposite currents. *Coastal Engineering*, 2013, 71: 87-101.
 - 11 European Union. HYDRALAB IV, ec.europa.eu/research/infrastructures/pdf/hydralabiv.pdf, 2012.
 - 12 Gerritsen, H., Sutherland, J., Deigaard, R., et al. Composite modelling of interactions between beaches and structures. *Journal of Hydraulic Research*, 49(sup1), 2009:2-14.
 - 13 Janssen, C.M., Riberrink, J.S. Influence of grain diameter on sand transport in oscillatory sheet flow. *Proceedings of the 25rd International Conference on Coastal Engineering*, Orlando, Reston: ASCE, 1996: 4779–4792.
 - 14 Kos'yan, R.D., Krylenko, M.V., Vincent, C.E. Fluctuations of instantaneous vertical distribution of suspended sediment in the surf zone. *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, Singapore: World Scientific, 2007: 1-8.
 - 15 Kraus, N.C., Smith, J.M., Sollitt, C.K. SUPERTANK laboratory data collection project. *Proceedings of the 23rd International Conference on Coastal Engineering*, Reston: ASCE, 1992: 2191-2204.
 - 16 Lamb, M.P., D'Asaro, E., Parsons, J.D. Turbulent structure of high-density suspensions formed under waves. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, C12026:1-14.
 - 17 Lippmann, T.C., Holman, R.A. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95:11575-11590.
 - 18 Maddux, T.B., Cowen, E.A., Foster, D.L., et al. The cross-shore sediment transport experiment (CROSSTEX). *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, San Diego, ASCE, 2006:2547-2559.

- 19 Madsen, O.S., Grant, W.D. Quantitative description of sediment transport by waves. Proceedings of the 15th International Conference on Coastal Engineering, 1976:1093–1112.
- 20 Nielsen, P. Three simple models of wave sediment transport. Coastal Engineering, 1988, 12(1): 43-62.
- 21 Nielsen, P., Callaghan, D.P. Shear stress and sediment transport calculations for sheet flow under waves. Coastal Engineering, 2003, 47(3):347–354.
- 22 Nomden, H.G. SANTOSS sand transport model implementing and testing within the morphological model UNIBEST-TC. Master thesis, University of Twente, The Netherlands, 2001.
- 23 O'Donoghue, T., Wright, S. Flow tunnel measurements of velocities and sand flux in oscillatory sheet flow for well-sorted and graded sands. Coastal Engineering, 2004, 51:1163–1184.
- 25 O'Donoghue, T., van der A, D.A. Laboratory Experiments for Wave-Driven Sand Transport Prediction. In: Kranenburg, W.M., Horstman, E.M. and Wijnberg, K.M. (eds.) NCK-days 2012: Crossing borders in coastal research: jubilee conference proceedings. Enschede, the Netherlands: University of Twente, 2012, 61-67.
- 26 Ribberink, J.S., Chen, Z. Sediment transport of fine sand under asymmetric oscillatory flow. Delft: Delft Hydraulics, 1993.
- 27 Ribberink, J.S. Bed-load transport for steady flows and unsteady oscillatory flows. Coastal Engineering, 1998, 34(1-2): 59-82.
- 28 Schretlen, J.L.M., van der Werf, J.J., Ribberink, J.S., et al. New high-resolution measurements of wave boundary layer flow under full-scale surface waves. Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering, 2008, Hamburg, Germany.
- 29 Shimizu, T., Ikeno, M. Experimental study on sediment transport in surf and swash zones using large wave flume. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1996:3076-3089.
- 30 Silva, P.A., Temperville, A., Santos, F.S. Sand transport under combined current and wave conditions: a semi-unsteady, practical model]. Coastal Engineering, 2006, 53(11): 897-913.
- 31 Thorne, P. D. Hanes, D.M. A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. Continental Shelf Research, 2002, 22(4): 603-632.
- 32 van der A, D.A., Ribberink, J.S., van der Werf, J.J., et al. Practical sand transport formula for

- non-breaking waves and currents. *Coastal Engineering*, 2013, 76: 26-42.
- 33 van Os, A. From HYDRALAB-I to HYDRALAB-III? International Conference on towards a balanced methodology in European hydraulic research,1,1-8, Budapest, 2003.
- 34 van Steeg, P., van Schijndel, S.A.H. Integrated European experimental hydraulic research within HYDRALAB III (web.sbe.hw.ac.uk/...European.../Experimental%20 Methods), 2010.
- 35 Vincent, C.E., Hanes, D.M., Dohmen-Janssen, C.M., et al. Suspension by regular and group waves over bedforms in a large wave flume (SISTEX 99). *Proceedings of Coastal Dynamics'01*, Lund, Sweden, 2001:303–312.
- 36 Watanabe, A., Isobe, M. Sand transport rate under wave-current action. *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering*, Reston: ASCE, 1990:2495–2507.
- 37 Watanabe, A., Sato, S. A sheet-flow transport rate formula for asymmetric, forward-leaning waves and currents. *Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering*, Lisbon, Portugal, 2004:1703–1714.
- 38 Wright, L.D., Short, A.D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches. *Marine Geology*, 1984, 56:93-118.
- 39 曹祖德、焦桂英. 粉沙质海岸泥沙运动推悬比的确定. *水道港口*, 2002, 23(1):12-15.
- 40 曹祖德、焦桂英、赵冲久. 粉沙质海岸泥沙运动和淤积分析计算. *海洋工程*, 2004, 22(1):59-65.
- 41 韩西军. 粉沙质海岸泥沙淤积的研究. *水道港口*, 1994, 3:22-28.
- 42 刘家驹. 粉沙淤泥质海岸的航道淤积. *水利水运工程学报*, 2004, 1:6-11.
- 43 罗肇森, 马进荣, 张晓艳. 从京唐港大风期骤淤浅议粉沙质海岸建港布置和航道选线. *中国港湾建设*, 2007, 147(1): 35-41.
- 44 王玉海, 蒋卫国, 王艳红. 冲刷物理模型试验的比尺效应研究. *泥沙研究*, 2012, 3:31-34.
- 45 王玉海、郭传胜、刘大滨, 等. 大型波浪水槽输沙实验研究. 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 大连, 2013,783-788.
- 46 王玉海, 汤立群, 王崇浩, 等. 波浪作用下非恒定输沙规律研究进展. *水利水电科技进展*, 2013,33(6): 17-22.
- 47 杨华、赵冲久、侯志强, 等. 粉沙质海岸波流共同作用下泥沙垂线分布研究. *水道港口*, 2006, 27(3):142-146.
- 48 赵冲久. 波浪作用下粉沙质底沙运动特性的试验研究. *水道港口*, 1994, 1:34-39.

- 49 赵冲久、秦崇仁、杨华, 等. 波流共同作用下粉沙质悬移质运动规律的研究. 水道港口, 2003, 24(3):101-108.
- 50 赵冲久、秦崇仁、黄明政. 波流共同作用下近底高含沙水层的探讨. 水道港口, 2005, 26(1):12-16.