

波流联合作用下的海底沙波移动对海底底床稳定性影响的研究进展

The research situation of bed-form stability influenced by seabed sand wave migration under wave combined current conditions

王伟伟, 阎 军, 范奉鑫

(中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)03-0089-05

海底沙波常见于潮流作用较强的内陆架海域, 是一种脊线与潮流流向垂直的微地貌形态, 一般在 40 ~ 100 cm/s 的流速形成。沙波既可大面积自成体系, 也可分布在沙脊的坡面上, 呈不对称形态。泥沙的粒度、沉积物供给以及水深^[1]等因素对海底沙波的发 育都有影响。

随着对海洋资源的开发和海底工程设施的建设, 人们发现沙波型底床的频繁活动对海底光缆, 输油管线、航道以及近岸工程设施等影响很大, 因而对沙波型底床的研究引起海洋地质学家和海洋工程学家的重视^[2,3]。海洋工作者对沙波型底床做了大量的研究工作^[4,5]。作者从沙波的成因机理和沙波的迁移机制总结了目前国内外沙波型底床的研究现状, 在此基础上, 探讨了下一步沙波型底床稳定性研究的主要方向。

1 沙波的成因机理

沙波型底床发育序列正常情况下为: 沙纹-沙垄-沙浪, 这 3 种底床底型统称为沙波。沙波发育的不同阶段对沙波成因机理有不同的解释。钱宁^[6]针对沙纹、沙垄和沙浪 3 种河床沙波发育的水流条件, 总结前人研究结果, 对沙波型河流底床的成因机理进行了系统的讨论。

在对河流沙波研究的基础上, 海洋工作者对海底沙波型底床的成因机理做了大量的研究工作, 从海

底沙波形成的水动力环境考虑主要有以下 3 个方面:

(1) 潮流往复运动是沙波形成的动力来源: 王文介^[7]认为潮流往复运动, 是形成空间上周期性变化沙波的动力机制, 指出底床的发育演化跟底流速度的大小有关; Hulscher^[8]考虑垂向上潮流循环, 得出沙波周期性的规则外形是由于潮流空间上的均一性和时间上的对称性引起的。(2) 波浪作用形成海底沙波: 冯文科^[9]、王尚毅^[10]等从水流底部紊动结构角度分析沙纹的形成, 认为床面上做周期性摆动的泥沙颗粒, 在共振作用下, 波谷处的泥沙颗粒与波峰处的泥沙颗粒受到的水流推动力大小不同, 造成床面泥沙空间上呈周期性的侵蚀和堆积; 张永刚^[11] 对非线性的 Boussinesq 方程进行二阶波求解, 认为与时间无关的周期性波动解是波驱沙波的主要形成原因; Yalin^[12]认为水面波是沙浪产生的直接原因, 并认为其产生与福氏数有关; Voropayev^[13]通过水槽实验验证了驻波驱动底床形成沙波的过程。(3) 波浪与潮流叠加驱动海底沙波的形成: Li^[14]通过海底视频图像观察到波浪与潮流以小角度叠加形成的沙波可以从沙波圆形波峰、直线且更规则的形状上与潮流控制条件下的沙波

收稿日期: 2004-11-24; 修回日期: 2006-04-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目

作者简介: 王伟伟 (1979-), 男, 山东烟台人, 在读博士, 从事海洋沉积动力学研究, E-mail: wangweiwei@ms.qdio.ac.cn



区分开。

不同的水动力环境都能形成沙波,并且波浪、潮流以及波浪潮流联合控制条件下形成的沙波形态存在差异,可以看出沙波形成的水动力条件复杂多变,对沙波形成机理的解释具有区域性,还没有形成系统的理论,需要进一步的研究。

2 沙波的迁移

2.1 近岸波流共存时底床边界层内的剪切速度和剪切力

汪亚平^[15]对底床边界层内波流作用的流速结构和剪切力进行了总结,但其对影响底床切应力的因素如波流摩擦系数、底床粗糙度及波流间的作用,没有做详尽的论述。对底床剪切力和剪切速度的分析,主要思路是通过求解底床边界层方程,得到底床速度分布,进而得出底床剪切力和剪切速度的变化情况。主要的理论有单参数的 Prandtl 混合长度理论、GM 的涡动粘性线性变化理论以及双方程的 k-e 模型,沙波型底床受到的剪切力是沙波移动的直接动力来源,对底床剪切力的研究有助于弄清泥沙起动、输运以及沙波的移动。

单参数模型: Prandtl 混合长度理论: Li^[16]基于测得的流速剖面,利用对数拟和获得边界层平均剪切速度,结合内外边界层的剪切速度比值和底床沙纹尺度,获得边界层内的表面剪切速度,同时针对 SM 模型近底床剪切速度需要迭代计算以及其表达式系数不确定性,给出直观简洁的近底床剪切速度表达式; Friedrichs^[17]在 prandtl 速度表达式引入浮力通量,结合野外观察验证细颗粒泥沙或泥质底床,得出密度分层使得传统的 Prandtl 对数剖面拟合分析得到的表观剪切速度比真实的表观剪切速度偏大。

GM 模型: Grant 和 Madsen^[18]利用随离底床距离线性变化的涡动粘性,对波浪边界层内和波浪边界层外两层分别封闭求解雷诺方程。对波流联合作用的近底床剪切速度的求解考虑波流摩擦系数、波流间的夹角为小角度、稳定流速度、最大的近底床波浪轨迹速度以及两者相互间的非线性作用, Grant 和 Madsen^[19]通过给定波流比例系数,迭代求解波流联合剪切速度,计算中考虑波流摩擦系数、底床粗糙度、波浪和潮流间的非线性作用以及波流间夹角; Wright^[20]把 Wiberg 和 Harris 的波控环境下的沙纹尺度计算模型应用到 GM 模型计算底床粗糙度; Li^[21]

验证并利用 Nielson 给出的弱泥沙输运情况下,由于沙波存在而改进的底床剪切速度表达式,验证波流联合作用下 GM 模型对表面摩擦剪切速度计算的可靠性。同时得出波流结合情况下,利用 GM 模型计算的波流非线性计算比线性计算得出的表面摩擦剪切速度大 20%,且随着波流方向夹角变化而变化; Li^[22,23]利用 GM 的边界层理论,结合波流摩擦系数和底床粗糙度,通过迭代求解波浪跟潮流比例系数,得出波流联合作用的剪切速度,同时在计算底床粗糙度时考虑了泥沙颗粒粗糙度、底床形状粗糙度以及底沙输运粗糙度。

曹祖德、孔令双等^[24,25]假定波流联合作用的底床粘性副层的流动为层流,对波流联合作用的底流速分成定常和非定常分别求解,结合波流摩擦系数求得波流联合作用的底床剪切力和剪切速度。

k-e 模型: 吴永胜^[26]利用 k-e 紊动模型封闭雷诺方程,对波流联合作用下,紊动边界层内一维流场数值模拟分析得出水流对波流耦合作用下的剪切流速的贡献要比其对线性叠加作用下的剪切流速的贡献小得多,且剪切流速在波浪与水流线性叠加情况下比波流耦合情况下的值要大,而耦合情况比纯水流情况下的数值要大,说明波流之间是非线性作用的; Holmedal^[27]指出无量纲最大底部剪切应力与波浪振幅的均方根和底床粗糙度比值、粗糙度和水深的比值、潮流速度和波浪速度均方根的比值以及波流夹角有关, Holmedal^[28]忽略水平对流项,利用 k-e 模型封闭求解二维流速场的雷诺方程,得出在任意波浪叠加潮流情况下的无量纲最大底部剪切应力的密度分布,且其大小随着潮流的加强而增大。

波流间的相互作用不能采用简单的线性叠加,二者间是非线性耦合的。相对于单参数方程的湍流粘性系数的局地性, k-e 模型能计算整个边界层区域的剪切力,但由于计算的复杂性目前还没有应用到沙波型底床剪切力和剪切速度的计算。上述的模型中, Li 等^[22,23]以 GM 的边界层理论为基础,引入多种的粗糙尺度计算底床粗糙度,考虑波流比例系数,对波流联合剪切速度的迭代求解,虽然过程比较繁琐但较为合理地计算了沙波型底床的剪切力和剪切流速。

2.2 泥沙的起动

泥沙起动作为泥沙输运的重要组成部分,自希尔兹提出希尔兹曲线以来,国内外研究者做了大量的研究工作。



Yalin^[12]基于希尔兹曲线纵横坐标都含有摩阻流速,计算过程需要叠代,将泥沙颗粒雷诺数和希尔兹拖曳函数结合成亚林参数,在希尔兹曲线的横坐标中消除了摩阻流速,从而简化了对希尔兹拖曳函数的求解过程;Yalin和Karahan^[29]研究了层流条件下的泥沙起动情况,结合前人研究的紊流泥沙起动数据,发现这两种水流状态下的泥沙起动遵循不同的规律,但当雷诺数很小的时候,两种水流状态下的泥沙起动曲线趋于同一条渐近线;曹祖德^[30]等利用大量泥沙起动试验数据,指出泥沙起动的层流和紊流阶段遵循不同的规律需要分别考虑;Pahitis^[31]指出由于泥沙起动具有随机性,且流场和底床泥沙相互作用的复杂性,运用希尔兹函数的平均值判断泥沙起动会产生很大误差,建议判断泥沙起动,使用大量泥沙开始移动所对应的希尔兹函数最小值和最大值的包络线方法;Roux^[32]基于Banold(1946)和Manohar(1955)的实验数据,利用波浪周期和无量纲沉降速度表示的无量纲临界波浪轨迹速度,计算粗糙和光滑水力条件下的临界轨迹速度;You^[33]指出在计算Rance和Warren(1968)的粗糙水力条件下的临界轨迹速度,即当流速 $U > 50$ cm/s时,偏差较大;Roux^[34]利用Rance和Warren的数据对其计算方法进行修改,从而将公式的实用范围扩大到 $0 < U < 150$ cm/s。

目前判断泥沙起动的主要思路是拟合实验数据,给出拟合曲线。但是判断泥沙起动标准有很大的主观性,使得各家实验曲线相差较大。Pahitis^[31]建议采用包络线思想判断泥沙起动和Roux^[34]避开判断水力状态是否光滑的泥沙起动计算公式,都对以往的计算公式有一定的改进,但是泥沙的形状尤其是泥沙级配对泥沙起动的影响还需要做进一步的工作。

2.3 近岸海底沙波的迁移速率及迁移方向

目前针对海底沙波的迁移速度及方向,国内外研究者已做了大量的工作。蒋建华等^[35]利用非静力假定湍流封闭模式模拟沙波的湍流场,结合Bagnold的推移质输沙方程指出非对称流作用下沙波的移动方向从属于余流方向;夏东兴、冯文科^[1,9,36,37]等用基于统计手段的底流玫瑰图确定沙波的移动方向为潮流主流向。

Blondeaux^[38]等认为风生波与潮汐叠加产生的辐射应力造成沙波的移动;Voropayevi^[13]等通过水槽实验模拟认为沙波的迁移跟底床沙波形成后引起的次生流和泥沙颗粒受到的重力之间的相互作用有很大

关系,但详细的物理机制目前还不清楚。

对于沙波移动速度一种研究思路为,假定沙波尺度均一,纵剖面为一定几何图形,将沙波移动速率表示为泥沙输运率,泥沙密度以及沙波波高的函数,其中Rubin和Hunter^[39]假定纵剖面为三角形,Amos^[40]假定纵剖面为梯形。

另一种思路是把水动力方程和底床变化方程联系起来数值求解,得到底床高程变化方程,进而得到沙波的移动速度。Nemeth^[4]对流速、自由水面以及底床高程进行一阶线性分析求解,得到沙波的迁移速度。把水平速度分解为定常和非定常,指出与潮流叠加的风生流或者压力梯度流引起的潮流不对称,造成沙波迁移;Besio等^[41]认为Nemeth的模型只能解释沙波的顺流移动而不能解释沙波的溯流移动,利用底床变化方程跟流函数的关系,通过求解底床变化方程,得出沙波移动速度的表达式,认为M4潮与M2潮叠加造成沙波的顺流和溯流移动。

对于沙波的移动方向,目前比较认同的是从属于余流方向。对于沙波移动速度的讨论,数值模拟求解的思路只是考虑潮流场,没有考虑波流联合作用对沙波移动的影响且对沙波移动速率的计算只考虑底沙输运故使得模拟结果小于真实值。而把沙波移动速率表示为泥沙输运率函数的做法弥补数值模拟的缺陷,但是其得出的沙波移动速率不适合拓展到整个研究区域。浅海环境下的余流比河流情况下的余流要小得多,直接将基于河流环境下的沙波移动速率应用到浅海环境下不是一个明智的做法^[4]。基于极端海域条件在短时间造成的沙波移动对底床稳定性的影响不可忽视,目前在模拟正常环境流场的基础上,需要对极端条件下沙波的移动做进一步的工作。

3 小结

总结了上述国内外关于浅海沙波型底床稳定性的研究现状,探讨了沙质底床稳定性下一步的研究方向:(1)结合野外观测和记录手段获得的参数测量结果,模拟底床变形,同时将模拟结果与实测结果进行对比,对已有模型进行校正。(2)在不同条件下,对现有的底床边界层预测理论适用性进行验证,尤其是对极端海域条件下波流边界层的预测模型进行验证和完善。(3)沙波移动对底床变形的影响以及底床变形对近底床波流剪切力、流速剖面和泥沙再悬浮的反作用。

参考文献：

- [1] 夏东兴, 吴桑云, 刘振夏, 等. 海南东方岸外海底沙波活动性研究 [J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(1):17-24.
- [2] Morelissen R, Hulscher S J M H, Knaapen M A F, *et al.* Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines [J]. **Coastal Engineering**, 2003, 48:197-209.
- [3] Nemeth A A, Hulscher S J M H, Huij J V, *et al.* Modeling sand wave migration in shallow shelf sea [J]. **Continental Shelf Research**, 2002, 22:2 795-2 806.
- [4] 程和琴, 王宝灿. 波、流联合作用下的近岸海底沙波稳定性研究进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(4):367-371.
- [5] 庄振业, 林振宏, 周江, 等. 陆架沙丘(波)形成发育的环境条件[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(4):5-10.
- [6] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科技出版社, 1983.156-171.
- [7] 王文介. 南海北部的潮波传播与海底沙脊和沙波发育 [J]. 热带海洋, 2000, 19(1):1-7.
- [8] Hulscher S J M H. Tidal induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1996, 101(C9): 20 727-20 744.
- [9] 冯文科, 夏真, 李小荣. 南海北部海底沙波稳定性分析 [J]. 南海地质研究, 1993, 5:26-42.
- [10] 王尚毅, 李大明. 南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆坡海底沙波动态分析[J]. 海洋学报, 1994, 16(6):122-132.
- [11] 张永刚, 李玉成. 波浪作用产生沙波的动力机制的研究[J]. 海洋工程, 2000, 18(1):33-37.
- [12] Yalin M S. *Mechanics of Sediment Transport* [M]. Oxford England: Pergamon Press, 1972.74-290.
- [13] Voropayev I S I, McEachern G B, Boyer D L. Dynamics of sand ripples and burial/scouring of cobbles in oscillatory flow [J]. **Applied Ocean Research**, 1999, 21: 249-261.
- [14] Li M Z, Amos C L. Field observations of bedforms and sediment transport thresholds of fine sand under combined waves and currents [J]. **Marine Geology**, 1999, 159:147-160.
- [15] 汪亚平, 高抒, 贾建军. 海底边界层水流结构及底移质搬运研究进展 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(3): 101-106.
- [16] Li M Z. Direct skin friction measurements and stress partitioning over movable sand ripples[J]. **Journal of geophysical research**, 1994, 99(1):791-799.
- [17] Friedrichs C T, Wright L D, Hepworth D A, *et al.* BBL processes associated with fine sediment accumulation in coastal seas and bays [J]. **Continental Shelf Research**, 2000, 20:807-841.
- [18] Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom [J]. **Journal of Geophysical Research**, 1979, 84(C4):1 797-1 808.
- [19] Grant W D, Madsen O S. The continental-shelf boundary layer [J]. **Annual Reviews Fluid Mechanics**, 1986, 18:265-305.
- [20] Wright L D, Sherwood C R, Sternberg R W. Field measurement of fairweather bbl processes and sediment suspension on the Louisiana inner [J]. **Continental Shelf Marine Geology**, 1997, 140:329-345.
- [21] Li M Z, Amos C L, David E H. Boundary layer dynamics and sediment transport under storm and non-storm conditions on the Scotian Shelf [J]. **Marine Geology**, 1997, 141:157-181.
- [22] Li M Z, Amos C L. SEDTRANS92: a sediment transport model for continental shelves [J]. **Computer & Geosciences**, 1995, 21(4):533-554.
- [23] Li M Z, Amos C L. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves[J]. **Computer & Geosciences**, 2001, 27:619-645.
- [24] 曹祖德, 唐士芳, 李蓓. 波流共存时的床面剪切力[J]. 水道港口, 2001, 22(2):56-60.
- [25] 孔令双, 曹祖德, 焦桂英, 等. 波、流共存时的床面剪切力和泥沙运动[J]. 水动力学进展, 2003, 18(1):93-97.
- [26] 吴永胜, 练继建, 张庆河, 等. 波浪—水流共同作用下的紊动边界层数值分析[J]. 水力学报, 1999, 9:68-74.
- [27] Holmedal L E, Myrhaug D, Rue H. Seabed shear stresses under irregular waves plus current from Monte Carlo simulations of parameterized models[J]. **Coastal Engineering**, 2000, 39:123-147.
- [28] Holmedal L E, Myrhaug D, Rue H. The sea bed boundary layer under random waves plus current[J]. **Continental Shelf Research**, 2003, 23:717-750.
- [29] Yalin M S, Karahan E. Inception of sediment transport[J]. **Journal of the Hydraulics Division**, 1979, 105(HY11): 1 433-1 443.

- [30] 曹祖德,孔令双,焦桂英.波流共同作用下的泥沙起动[J].海洋学报, 2003, 25(3):113-119.
- [31] Paphitis D.Sediment movement under unidirectional flows: an assessment of empirical threshold curves[J].*Coastal Engineering*, 2001,43:227-245.
- [32] Roux J P L. A simple method to predict the threshold of particle transport under oscillatory waves[J].*Sedimentary Geology*, 2001,143: 59-70.
- [33] You Z J,Yin B S.A discussion of the paper "A simple method to predict the threshold of particle transport under oscillatory waves" by J.P. Le Roux [J]. *Sedimentary Geology*, 2004,163:323-325.
- [34] Roux J P L.Le Roux J P. A simple method to predict the threshold of particle transport under oscillatory waves.*Sedimentary Geology*, 2001, 143: 59-70—Reply to discussion [J]. *Sedimentary Geology*, 2004, 163:327-330.
- [35] 蒋建华,张立人.沙波湍流场数值模拟及泥沙运动趋势讨论[J].海洋通报, 1995, 14(1):29-36.
- [36] 冯文科,黎维峰,石要红.南海北部海底沙波地貌动态研究[J].海洋学报, 1994, 16(6):92-99.
- [37] 冯文科,黎维峰.南海北部海底沙波地貌[J].热带海洋, 1994,13(3):39-46.
- [38] Blondeaux P, Brocchini M, Drago M.Sand formation: preliminary comparison between theoretical predictions and field data[J].*Iovenitti Proceedings of the IAHR Symposium on River Coastal and Estuarine Studies*, 1990, 38:302-320.
- [39] Rubin D M, McCulloch D S. Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations[J].*Sedimentary Geology*, 1980,26:207-231.
- [40] Amos C L, Bowen A J, Huntley D A, *et al.* Ripple migration and sand transport under quasi-orthogonal combined flows on the scotian[J].*Journal of Coastal Research*, 1999, 15(1):1-14.
- [41] Besio G, Blondeaux P, Brocchini M, *et al.* Migrating sand waves[J].*Ocean Dynamics*, 2003, 53:232-238.

(本文编辑 : 刘珊珊)

《海洋科学》杂志 2007 年征订启事

《海洋科学》是由中国科学院海洋研究所主办、科学出版社出版的学术性期刊, 中国自然科学核心期刊、华东地区优秀期刊、山东省优秀期刊。本刊以密切联系生产实际、服务于我国现代化建设为宗旨, 及时、快速报道海洋学及其分支学科的新成果、新理论、新观点、新工艺及新进展等, 对重大科研和应用性研究成果特别予以优先报道。主要刊载内容有: 海洋生物、海洋水产生产、海洋活性物质提取、海洋环境保护、海洋物理、物理海洋、海洋地质、海洋化学、海洋工程、海洋仪器研制等方面的学术论文、研究报告、研究简报、专题综述、学术讨论和争鸣、学术动态以及新产品介绍(有偿刊登)等。

本刊为月刊, 每月 9 日出版, 16 开本, 80 页, 每期定价 15 元, 全年订价 180.00 元。本刊国内外公开发行(国际刊号: ISSN1000-3096; 国内刊号: CN37-1151/P; 国内邮发代号: 2-655; 国外发行代号: M6666)。全国各地邮局均可订阅。欢迎各科研机构、高等院校、生产厂家和从事该领域的科技人员踊跃订阅。邮局订阅不便者可直接向本刊编辑部订购。本刊发行量在同类期刊中一直名列前茅, 订户遍及全国 20 多个省、市、自治区, 影响面广, 宣传力大, 欢迎广大的广告客户在本刊刊登广告, 价格优惠。

欢迎订阅《海洋科学》 欢迎广告惠顾

《海洋科学》编辑部地址: 山东省青岛市南海路 7 号, 266071;

电话及传真: (0532)82898755;

E-mail:MSJ@ms.qdio.ac.cn