

不同尺度海底沙波运移动力学模型研究*

林 緬 李 勇 邹 舒 觅

(1.中国科学院力学研究所, 北京, 100190)

摘要: 给出了实际海况下海底不同尺度沙波的定义, 采用理论分析、数值计算和经验公式相结合的研究方法, 提出了小尺度沙波和大尺度沙波运移的动力学模型, 探讨了不同波流比、沙波形状、砂粒粒径、M2 分潮和风速之比等各种复杂海洋环境下小(大)尺度沙波的运移规律。本研究是海底沙波运移的最新理论研究成果。

关键词: 不同尺度沙波; 沙波运移动力学模型; 波流比; M2 分潮和风速之比

1 引言

为满足海洋油气资源的勘探与开发的实际需要, 近十几年学术界针对海底沙波的运移特征进行了大量的探索。比如, 有的学者认为沙波运移主要是由潮流引起的, 其波峰移动方向和潮流运动方向几乎垂直, 沙波的移动速率依赖于潮流的性质, 大约为每年几米^[1-3]。然而一些实测结果表明, 沙波移动方向并不总是和潮流主方向一致, 有时沙波移动方向与潮流主方向完全相反。21 世纪初 Nemeth^[4]、Besio^[5]等人试图考虑不同分潮组合所带来的沙波运移来解释这一问题。概括起来, 现在学术界仍把潮流作为沙波运移的主要动力, 不考虑其他水动力因素, 也没有区分沙波尺度对运移方向的影响。

从直观上看, 如果潮流是驱动沙波运移的主要动力, 那么沙波的移动方向和潮流方向相反似乎很难理解, 因此应该考虑其他水动力的影响。由于沙波多处于浅海区, 我们认为风浪对底床形状变化的影响是不可忽视的。当床面附近波浪引起的振荡幅值和沙波波长同量级时, 我们定义这种沙波为小尺度沙波; 当振荡幅值远远小于沙波波长时, 此时定义沙波为大尺度沙波。因此本研究提出建立不同尺度下的沙波输移力学模型。

2 小尺度沙波运移模型

针对小尺度沙波的运移应考虑波浪和潮流共同作用。由于底边界为波状泥沙动边界, 附近湍流边界层非常复杂, 很难直接通过数值方法模拟。在工程界往往依赖经验公式。本研究中我们把模型计算和经验公式结合起来, 提出了预测小尺度沙波运移计算模型。从宏观上来说沙波的运移过程看作是形状不变的整体移动, 最常见的沙波移动速度公式可写为:

* 国家科技部“863”项目(项目编号 20060109Z3059)和中科院知识创新工程重要方向项目(项目编号 KZCX2-YW-212-2)资助。

$$U_{sw} = q / \gamma' \alpha \eta$$

这里 q 是推移质泥沙输移量； γ' 是孔隙度； α 为沙波形状因子； η 沙波波高。这一关系式隐含了两个假设：泥沙浓度不随时间变化和在沙波波谷处没有泥沙输移。从物理上讲这种假设是不合理的。一般来讲，沙波运移仅考虑推移质泥沙输移足矣，但对小尺度沙波来说，波状底床的存在使得泥沙运动完全不同于平底床情况或者大尺度沙波。实验发现，当底床附近水体振荡幅值略大于沙波波长时，那么水中某一点的悬移质含沙量在一个周期以内会出现 4 个峰值，而且这种现象在越靠近床面越明显。这完全是因为沙波床面附近流场不可避免地受到水黏性的影响，在背水面上不断有漩涡产生、发展、运移。这些涡具有很强的淘蚀、挟沙和输运能力。因此泥沙输移不仅取决于整个床面的瞬时剪应力，同时还取决于漩涡强度及其运移方向随时间空间的变化。因此预测小尺度沙波的运移不能只考虑推移质，还必须考虑漩涡所带来的悬移质泥沙。

推移质泥沙输移率 q_b (Fredsoe and Deigaard, 1992)^[6]:

$$q_b(x, t) = 5(\theta - \theta_c)^{1.5} \sqrt{g(s-1)d^3}$$

这里 d 是泥沙中值粒径； g 是重力加速度； $\theta = \tau / \rho_w (s-1)gd$ 是 Shield 数； $s = \rho_s / \rho_w$ 为泥沙密度和水密度之比。

悬移质泥沙输移率 q_s ，采用 Nielsen 的 Grab - Dump 模型^[7]。该模型来源于实验中观察到的波状底床上泥沙输移过程。其特点在于抓住了波状底床上漩涡的挟沙、运动的特点，摒弃了其他次要因素。其表示式为：

$$q_s(x, t) = p\omega U(S_{\min} - S_{\max})$$

这里 $(S_{\max}, S_{\min}) = 0.5/U^6 [(U_{\max})^6, (U_{\min})^6]$ ， $(U_{\max}, U_{\min}) = \sqrt{2/\rho_w f_{cw}} (\sqrt{\tau_{\max}}, \sqrt{\tau_{\min}})$ ， U 是波流速度幅值， U_{\max}, U_{\min} 由床面上剪应力决定；在非定常流中抽样函数 p 表示为：

$$p = 0.00033 \left(\frac{\theta - \theta_c}{\theta_c} \right)^{1.5} \frac{(s-1)^{0.6} g^{0.6} d^{0.8}}{\nu^{0.2}}。那么泥沙总输移率：$$

$$q(x, t) = q_b(x, t) + q_s(x, t)$$

沙波移动速度满足： $U_{sw} = q(x, t) \rho_s / 2\gamma' \eta$ ，与前面不同的是这里的 $q(x, t)$ 是随时间空间变化的。

采用大涡模拟方法计算不同形状底床上的流场，获得床面剪应力随时间空间分布。由计算结果可以看出，推移质泥沙和悬移质泥沙在什么粒径范围内对总输移率的贡献。在波流比比比较小的时候以推移质泥沙输移为主；当波流比比比较大时则是以悬移质泥沙输移为主（图 1）。从统计上讲，水流挟沙中泥沙运动完全取决于泥沙颗粒的大小、形状及水动力作用，与泥沙颗粒的历史以及其他泥沙颗粒的存在与否无关。这是和风沙运动不同之处。

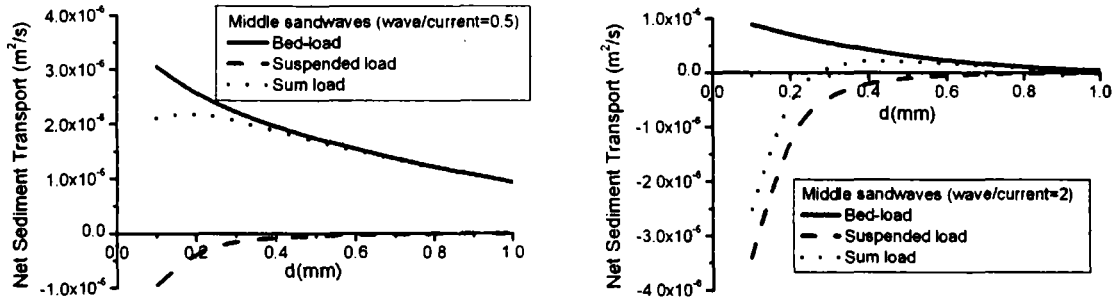


图1 不同波流比沙波移动速度随泥沙粒径变化曲线

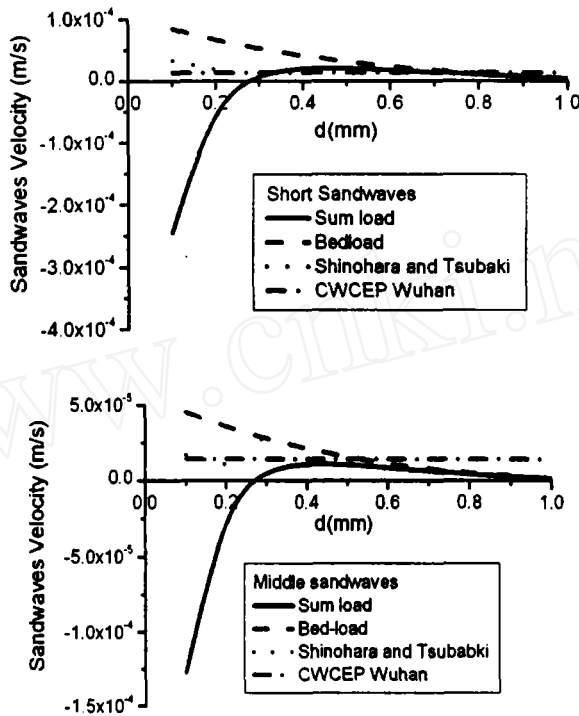


图2 计算结果和经验公式结果比较

选取两个经验公式 Shinohara—Tsubaki^[8]公式和武汉水利水电学院经验公式 (CWCEP)^[9]与计算结果进行比较。比较发现, 在泥沙粒径比较大的情况下, 我们的计算结果与他人结果符合得很好。但是他人模型无法解释观察到的现象。由于武汉水利水电的公式适用于河道情况, 这里只能从定性上看他们的结果和我们的量级一致。特别是在 λ/a 比较小的情况下。同时还可以看出当泥沙粒径大于 0.27mm 时, 计算得到的沙波移动速度为正, 也就是和主流方向一致。当泥沙粒径小于 0.27mm 时, 沙波移动速度为负, 和主流方向相反。这一结论和许多实际观测到的结果相符。

3 大尺度沙波运移模型

在很多海域沙质底床在潮流的作用下会形成一些尺度在百米甚至千米量级的沙波，其运移主要受到潮流、风成流的作用。因此我们提出考虑 M2 潮流和风成流联合作用，并且同时引入非对称沙波形状的影响，研究沙波的运移规律。无量纲化后的二维浅水波方程为^[10]：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + Ru \frac{\partial u}{\partial x} + Rw \frac{\partial u}{\partial z} = -R \frac{L\sigma}{U} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_v \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

边界条件为：

$$\left[\frac{10L\sigma^2}{g} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{UL\sigma}{g\delta} u \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right]_{y=0} = w \quad \left[\frac{\partial u}{\partial z} \right]_{y=0} = \tau_w$$

$$\left[\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right]_{y=1} = w \quad \left[E_v \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{y=1} = Su$$

其中 $E_v = A_v / \delta^2 \sigma$ ； $R = U / 10\delta\sigma$ ； τ_w 为风引起的表面切应力； S 为底床上摩擦系数。采用 Komarova 泥沙输移模型，与潮流模型结合，将底床变形用潮期平均泥沙通量来描述：

$$\frac{\partial \eta}{\partial T_m} = -\frac{\partial}{\partial x} (|\tau_b|^p [\tau_b - \lambda \frac{\partial \eta}{\partial x}])$$

这里 $T_m = 10\alpha t$ ； $\alpha = 8\tilde{\gamma}[\tau]^{3/2} / [(s-1)g\sigma\delta^2]$ ； $\tilde{\gamma} = (|\tau_b|/\tau_b - 3C_2/2\tau_b) H(|\tau_b| - C_2)$ ；

$\lambda = \frac{H}{10\delta} \left(\frac{3\theta_c g(s-1)d}{2\tilde{\gamma} \tan \phi_s [\tau]} + \frac{1}{\tan \phi_s} \right)$ ； $C_2 = \theta_c g(s-1)$ ， $H(x)$ 为 Heaviside 函数； τ_b 为底床表面切应力； ϕ_s 为泥沙的内摩擦角。

图 3 是波数 k 和沙波整体移动速度曲线图，首先可以看到该速度值为负，也就是说，沙波在该 M2 潮流场作用下，是向着 x 负方向，即缓坡方向移动的。其次，随着波数 k 的增长，两种形状的沙波移动速度都有所增加。两种形状的沙波移动速度的大小有所不同，很明显，同样的波数（波长）条件下，指数形式的沙波移动速度要快于余弦形式的沙波。将图中的无量纲速度转化为有量纲速度，得出两种沙波在 M2 潮流下的移动速率分别为 6m/a 和 9m/a，这与实际情况很接近。

在 M2 潮流场上叠加风场（定义： $\mu = \text{风速}/\text{潮流速度}$ ）。由图 4 可以看出，随着 μ 增加，沙波整体移动速度也越来越大，并且在较大 μ 情况下，沙波移动速度随波数 k 的变化也在加快。显然的，稳定的较大的底床剪应力对于沙波的移动起着决定性的作用。在这里，我们假设风成流与沙波移动的方向一致。如果风成流和 M2 潮流方向有所偏差，则其影响会比前面得到的结果偏小。除了流场以外，泥沙粒径对于沙波的运移也有重要的影响。由计算可知泥沙粒径从 0.05mm 的细砂到 0.5mm 的粗砂，相应的底床变形周期从 0.4a 上升到 2.35a。可以看出，随着泥沙粒径的增大，底床的变形周期也逐渐变长。这是由于随着粒径的增加，底床的摩擦系

数也随之增大,在同样的流场条件下,泥沙的移动就相应的变缓,从而使得底床变形周期延长。

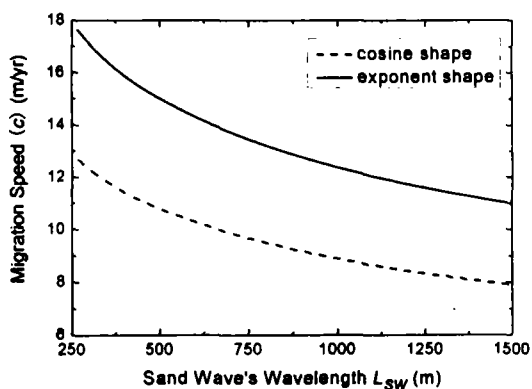


图3 沙波移动速度与沙波波长关系曲线

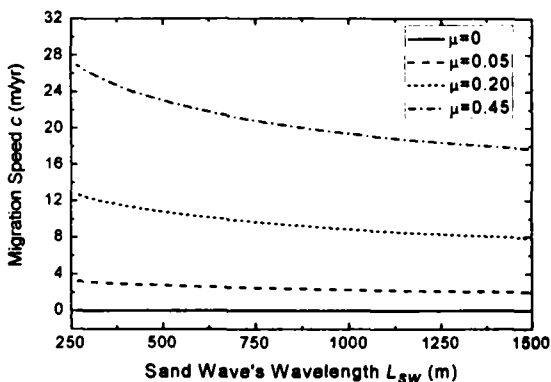


图4 不同 μ 条件下沙波移动速度图

4 结论

本研究根据海底沙波的基本特征及其所处海域提出了描述不同尺度沙波运移的动力学模型,并且得到了与实际相符的计算结果,证明了模型的可行性,为探究海底沙波运移的力学机理提供了有价值的方法。

参 考 文 献

- 1 Johnson M A. Predicted sand wave formation and decay on a large offshore tidal-current sand-sheet . Special Publication of the International Association of Sediment, 1981, 5:247-256.
- 2 Ashley J R L. Sand wave immobility and the internal master bedding of sand wave deposits. Geological Magazine, 1990, 117(5): 347-446.
- 3 Andersen, KH (1999). "The dynamics of ripples beneath surface waves and topics in shell models of turbulence," Ph.D. Thesis, University of Copenhagen.
- 4 Nemeth A A, Hulscher S J M H, De Vriend H J. Modeling sand wave migration in shallow shelf seas . Continental Shelf Research, 2002, 22: 2795-2806.
- 5 Besio G., Blondeaux P, Brocchini M. Migrating sand waves . Ocean Dynamics, 2003, 53: 232-238.
- 6 Fredsøe, J and Deigaard, R., "Mechanics of Coastal Sediment Transport" World Scientific, Singapore, 1992
- 7 Nielsen, P. "Coastal bottom boundary layers and sediment transport," Advanced series on Ocean engineering, 4, World Scientific, Singapore, 1992
- 8 Shinohara, K and Tsubaki, T. "On the characteristics of sand waves formed upon the bed of the open channels and rivers," Rep., Res. Inst. Applied Mech., Kyushu Univ. Japan, 1959, 7(25): 15-45.
- 9 武汉水利水电学院. 水动力学. 北京: 中国工业出版社, 1961: 31-40
- 10 Hulscher, S.J.M.H., Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. Journal of Geophysical Research, 1996, 101 (C9): 20727-20744

Investigation the dynamic models of the migration of varying scale sand-waves

LIN Mian, LI Yong, ZOU Shu-mi

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: Integrated theoretical analysis and numerical calculation with experience formula, the dynamic models for the migration of small and large scale sand-waves, defined in this paper, have been proposed. The paper has discussed the effects of the ratio of wave and current, the practical diamante, the ration of M2 constituent current and wind speed on the migration of small (large) scale sand-waves. This paper is of update research on the migration of sand-waves.

Key words: varying scale sand-waves; dynamics model for sand-waves migration; the ratio of wave and current; the ration of M2 constituent current and wind speed.