浅海陆架泥沙运移模型研究

林 缅 邹舒觅 袁志达 王伟伟
(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 108000)

摘 要 根据南海海域的特点提出了适合该海域的输沙模型. 考虑了风浪流联合作用下从深海大陆架到岸边的海底泥沙输移, 计算了准二维流场下的泥沙输移量及底床变形率, 讨论了水深和砂粒粒径对推移质和悬移质泥沙输移的影响, 并针对该模型提出了需进一步改进的地方.

关键词 南海海域, 泥沙输移模型, Ekman 层

引 言

随着社会的不断发展, 能源是人类必须面对和解决的问题. 20 世纪下半叶, 人们已经认识到海洋油气资源的巨大潜力, 发达国家从基础研究、勘探、开采等不同角度投入巨资, 并取得了举世瞩目的成就. 在我国海上石油开发也进入了蓬勃发展的阶段, 特别是南海海域储油区已被确定为今后一个时期中国海上石油开发的重点海域. 近二十年内, 中国海洋石油总公司已在南海东部的珠江口盆地, 西部的莺歌海盆地开发了近 8 个油气田或油田群. 2003 年中海油又宣布在南海东部珠江口盆地获重大天然气发现. 与这些令人振奋消息相伴而至的是和油气开采输送相关的一系列问题. 比如, 海底沙波稳定性及其迁移速度、迁移方向对油气管线安全性的影响; 在设计近海石油平台、海上储油罐等海上结构物时必须考虑近岸区沙波移动的权重, 等等.

一般而言, 沙波是由海岸非粘性沉积物而形成的, 具有高孔隙度和变异性, 是海底边界层潮流剪应力和海底砂砾沉积物互相作用的结果, 在有较强潮流和底砂分布的区域都有沙脊沙波地貌存在. 沙波不是固定不动的, 其移动速度量级大约为 10 m/y, 移动方向基本上和潮流作用方向垂直, 另外沙波还受到不同时期其他海洋水动力的作用, 使其形态和位置极不稳定. 现场观测表明, 沙波移动速度取决于底流速, 当底床附近流速度增加一倍时, 沙波移动速度将会达到原来速度的 32 倍. 沙波输移方向还和加载风向密切相关. 对澳大利亚阿道弗斯海峡 20 m 水深处的沙波区观测资料分析可知, 每年九月到次年二月由于季风方向发生了反转, 沙波的非对称方向也会在大约 47 天内发生反转, 反转后的沙波平均波长波高不变, 但输移方向发生了改变. 因此, 分析研究沙波是否稳定, 预测沙波运动规律是油气输送管道的路由设计中必不可少的重要环节.

地质勘探研究分析发现, 在我国渤海湾、东海及南海海域都不同程度存在大小不一沙波活动. 特别是对我国南海北部旁侧声呐调查资料表明, 在浅水海域分布着 3 个沙波区: (1) 广东近岸区. 水深在 5 ~ 20 m 之间, 尤其是雷州半岛以东岸外和江河出口处; (2) 在海南岛东方市以西岸外, 水深从 20 ~ 50 m 海域, 发育了大范围的沙波地貌; (3) 珠江口外. 南海北部大陆架的中部, 水深 80~300 m 之间的外陆架和上坡地带, 广泛分布着各种类型的沙波, 水深由浅至深沙波形状依次出现: 中型沙波 (波长 20~30 m, 波高 2 m 左右); 微型沙波 (波长 5~10 m, 波高 1~2 m); 大型沙波, (沙波波长 40~50 m, 波高 2 m 左右); 以及冲刷坑和坑间滩地等. 地质资料

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

研究表明这些沙波均属于不稳定的地貌类型. 目前有关我国南海海域沙波运移分析主要还是通过定性分析粗略地估计沙波运移速度, 从理论上研究南海海域海底沙波运移问题比较少. 本文将针对南海海域建立沙波输移模型, 探讨在风浪流作用下海底底床的变化, 并具体针对某一海域进行讨论.

1 建立沙波输移模型

我们知道, 南海海域位于印度洋和太平洋接合部, 被我国大陆、越南、菲律宾、婆罗卅等陆地所包围, 它是连接亚洲季风与澳洲季风的桥梁. 海洋学家大多认为, 大洋对南海的影响不大, 盛行于南海的季风为推动其海洋环流的主要外力. 南海的海流时空变化与季风息息相关, 既有边缘海的性质, 又有准大洋的性质, 既具有季节内振荡, 又有年际和年代际的振荡. 另外我们所考虑的海域属于浅水区, 地处季风带, 冬季强风和夏季台风使大浪经常发生, 沙波区沙粒处于起动状态, 推移质和悬移质泥沙输移对底床变形的影响都不能忽略.

考虑到我国南海海域的这些特点, 由此我们提出采用以下沙波输移模型 (Cookman, 2001). 该模型把风应力所形成的环流作为主要流场, 然后根据 Grant 和 Madsen (1979) 底部边界层理论给出波流作用下的底床附近水流速度场, 计算在该波流场作用下的泥沙输移. 假设海岸线是直线, 大陆架是二维的并且梯度很小, 风力和风向恒定, 海水密度不变且不可压缩, 涡量在边界以外恒定, 在水表面和底床层均呈线性变化 (见图 1).

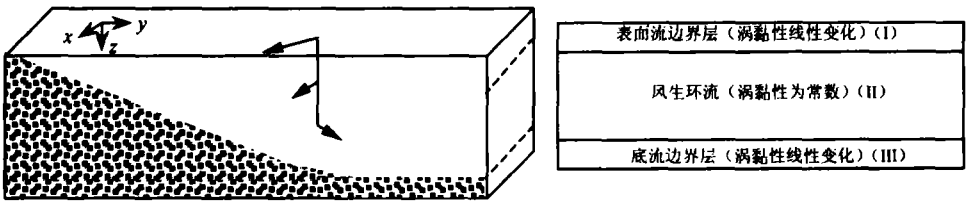

图 1 环流计算模型

速度场 忽略非线性项, 由表面风应力所形成的二维环流模型

$$\begin{cases} fv + K\dfrac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \\ -fu + K\dfrac{\partial^2 v}{\partial z^2} = g\dfrac{\partial \zeta}{\partial y} \end{cases}$$

其中, $u(z)(v(z))$ 是平行 (垂直) 于海岸方向的速度分量; f 是科氏系数; ζ 为水面方程; K 是涡黏性系数.

边界条件 上表面剪切力 τ_s: $\tau_s = \rho_a c_{ds} Q|Q|$, 海底床面剪切力 τ_c: $\tau_c = \rho_f c_d R|R|$

这里 $R(=\sqrt{\dfrac{\rho_a}{\rho_f}Q^2\dfrac{\cos\alpha}{\cos\gamma}\dfrac{c_{ds}}{c_d}})$ 为底床面上滑移速度, ρ_a 为空气密度; ρ_f 为海水密度; c_{ds} 为表面阻力系数; c_d 为底床阻力系数; Q 为风速, α 为风向 (或表面应力的方向); γ 为底床剪应力和海岸线的夹角, 满足

$$\begin{aligned} &-\left(qK\sqrt{2}\sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}\frac{\cos\alpha\cos\gamma}{c_d c_{ds}}}\right)\sin\gamma(\cosh 4\lambda - \cos 4\lambda) = \\ &Q\cos\alpha[\sin(\alpha-\pi/4)\sinh 4\lambda - \cos(\gamma-\pi/4)\sin 4\lambda] - \\ &2Q\cos\gamma[\sin(\alpha-\pi/4)\sinh 2\lambda\cos 2\lambda - \cos(\alpha-\pi/4)\cosh 2\lambda\sin 2\lambda] \end{aligned}$$

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

假设在区域 (II), K 为常数，得到方程组的解为

$$u(z)=G-\frac{N(A-B)-M(C-D)}{(4qK)(\cosh 2\lambda+\cos 2\lambda)}-\frac{P(A+B)+O(C+D)}{(4qK)(\cosh 2\lambda-\cos 2\lambda)}$$

$$v(z)=-\frac{M(A-B)+N(C-D)}{(4qK)(\cosh 2\lambda+\cos 2\lambda)}-\frac{O(A+B)-P(C+D)}{(4qK)(\cosh 2\lambda-\cos 2\lambda)}$$

这里 $q=\sqrt{\frac{f}{2K}}$, $\lambda=\frac{Hq}{2}$, $A,B,C,D=f(q,\lambda,z)$, $M,N,O,P=g(\gamma,\alpha,R,Q)$; G 为地转流速度，和 R,γ,α 有关. 在底流边界层内 (III), 假设涡黏性随深度增加而增加，速度则相反，其分布为

$$u(z)=\left(\frac{U_{*c}}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{k_b}\right)+8.5U_{*c}\right)\cos\gamma,\quad v(z)=\left(\frac{U_{*c}}{\kappa}\ln\left(\frac{z}{k_b}\right)+8.5U_{*c}\right)\sin\gamma$$

这里 $k_b=Z_r e^{\kappa(8.5-1/\sqrt{c_d})}$, Z_r 为底边界层厚度.

泥沙输移 考虑单一泥沙粒径下悬移质和推移质的侵蚀、输移和沉淀. 泥沙沉积速率与垂直海岸方向的泥沙通量满足

$$\frac{1}{C_b}\frac{\partial h}{\partial t}=-\frac{\partial q_y}{\partial y}=-\left(\frac{\partial q_{by}}{\partial y}+\frac{\partial q_{sy}}{\partial y}\right)$$

其中， h 是底床高度； C_b 是底床的泥沙体积浓度； q_{by}, q_{sy} 分别为推移质和悬移质沿垂直海岸方向的泥沙通量，由以下关系式确定.

推移质泥沙通量 q_{by}

$$q_{by}=q_b\sin\gamma$$

式中 q_b 是推移质输移率，由 Yalin (1963) 推移质公式确定

$$q_b=a_1U_{*b}SD\left(1-\frac{1}{a_2S}\ln(1+a_2S)\right)$$

这里 $a_1=0.635$, $a_2=2.45\left(\frac{\rho_f}{\rho_s}\right)^{0.4}\left(\frac{\tau_{crit}}{(\rho_s-\rho_f)gD}\right)^{1/2}$; $S(=(\tau_b-\tau_{crit})/\tau_{crit})$ 为标准化平均超边界剪应力； $\tau_b(=\rho_f U_{*sk}^2)$ 为作用在砂粒表面的平均切应力； U_{*sk} 为表层摩擦速度. 若考虑波的影响，则 τ_b 需要计算瞬时量 τ_b', 并在一个周期内作平均而得到.

悬移质泥沙通量 q_{sy}

$$q_{sy}=\int_{z=Z_0}^{z=Z_{ref}}C_{zm}v(z)\mathrm{d}z$$

式中， $C_{zm}(=C_{z_0m}(z/z_0)^{-(0.74w_f/\kappa U_{*c})})$ 是底床表面的平均泥沙体积浓度； w_f 是砂粒沉降速度； $U_{*c}(=\sqrt{\tau_c/\rho_f})$ 是纯潮流的剪切速度.

2 计算结果及讨论

从陆架海底沙波沙丘研究已知，海底陆架流速、水深、粒度及其他环境参数影响着海底沙丘底形的形成和发育. 本文我们就流场特征、粒度和水深 3 个方面讨论.

由以上波流模型我们计算了平行于海岸和垂直于海岸两个方向流速，以及剪应力大小及其方向的变化 (图 2). 底床形状如图所示. 可以看出平行于海岸方向的速度沿深度减少，而垂直于海岸的速度分量，在上 Ekman 层中为负，在底床附近的下 Ekman 层内为正，在地转风的中

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

心没有垂向分量. 剪应力变化幅度不大, 呈台阶型, 在距岸大致 50 km 时达到最大, 然后基本上保持不变. 剪应力方向大约有 20° 的偏转. 剪应力方向的变化决定着泥沙输移方向.

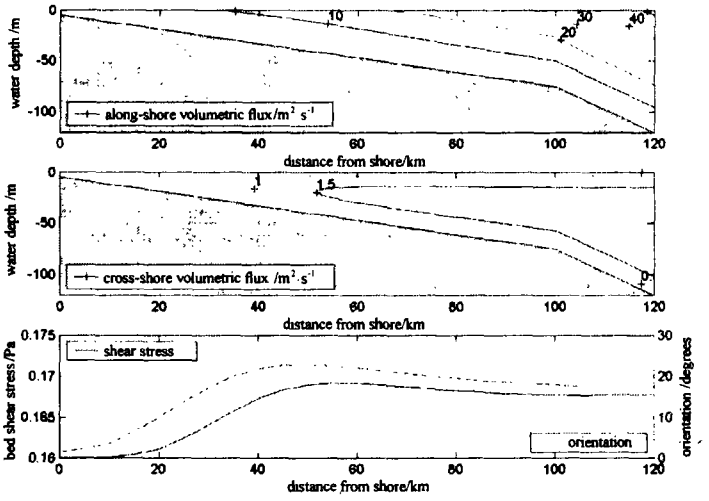

图 2 流场及剪应力分布

给出 4 种泥沙粒径: 0.075 mm (细砂)、0.163 mm (中细砂)、0.25 mm (中砂)、0.6 mm (粗砂). 讨论泥沙总输移量以及底床变化率随粒径变化 (图 3). 很明显, 随着泥沙粒径变化, 泥沙总

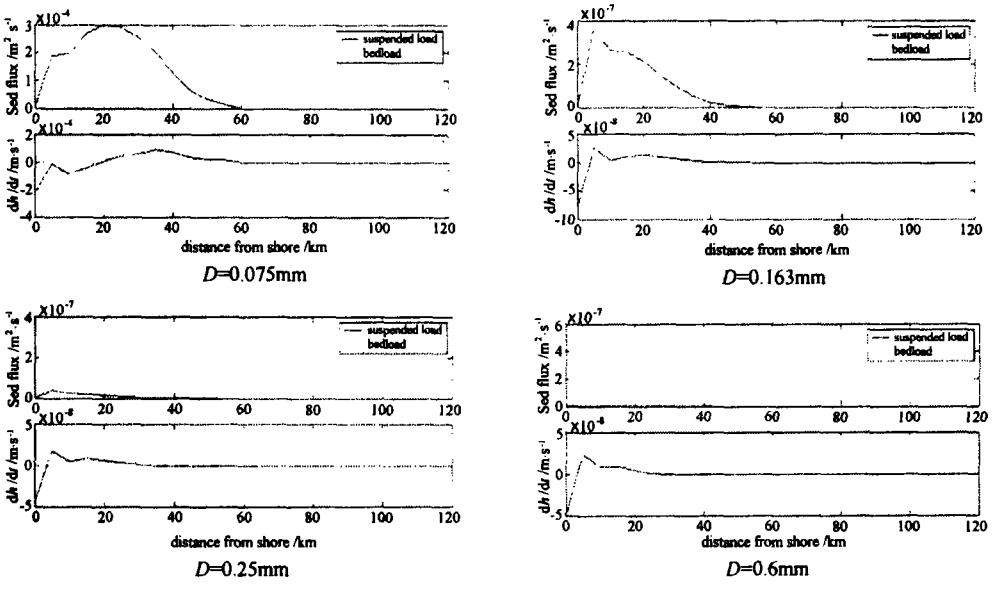

图 3 推移质和悬移质泥沙通量及底床变化率变化曲线

通量中悬移质和推移质所占比份也随之改变. 当泥沙粒径为 0.075 (细砂) 时, 无论是否存在沙波, 几乎没有推移质输移. 而此时底床变形情况, 在距岸 20 km 以内是以侵蚀为主, 20 ~ 60 km 则是以泥沙堆积为主; 当粒径为中细砂时, 推移质和悬移质基本相当, 底床变形以堆积为主; 当粒径大于中砂时, 则都是以推移质输移为主, 底床变形情况也与中细砂类似. 在图 4 中我们专门给出了总输移量随粒径变化曲线. 可以看出, 泥沙输移量对泥沙粒径十分敏感, 发生最大

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

输移的位置也各不相同.

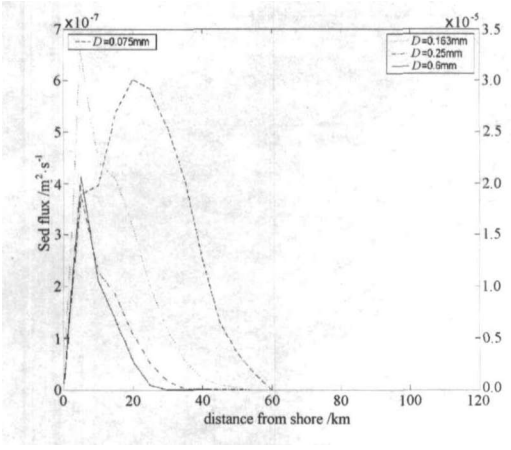

图 4 总泥沙输移量随粒径变化曲线

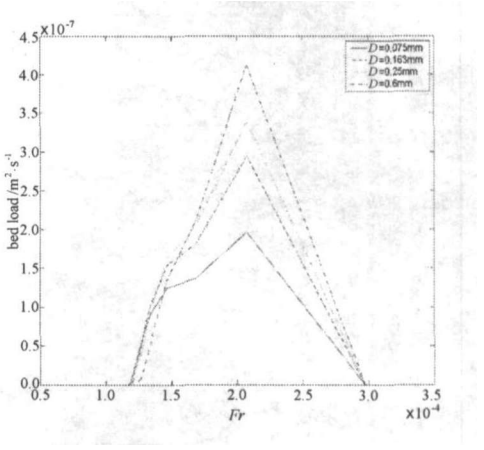

图 5 推移质泥沙输移量随水深变化曲线

由于对沙波运移来说是以推移质形式为主，以下我们主要讨论推移质输移. 图 5 给出了当水深 ($Fr = U^2/gh$) 变化，底床上推移质通量的变化. Fr 数为 2.1×10^{-4} 输移最为明显. 很明显，最大输移量随粒径变化而最大输移量发生的位置不随粒径而变. 这说明底床变形只和底流速相关.

考虑我国南海珠江口盆地海域，南海北部大陆架中部，20°40′ ~ 21°20′N、115° ~ 116°E 范围内. 在这一海域分布着西江、惠州、流花、陆丰等油气田. 根据旁测声呐资料发现在水深 130~300 m 海域内出现大面积沙波区，沙波类型有微型沙波、中型沙波和巨型沙波 3 种. 根据海浪资料，海浪分布特征受季风影响，在冬季平均波高 $H = 0.8 \sim 2.2$ m，夏季平均波高 $H = 0.8 \sim 1.3$ m，平均周期 $T = 3.0 \sim 4.5$ s. 图 6 给出了该海域流场分布，我们取平均值对底床变形

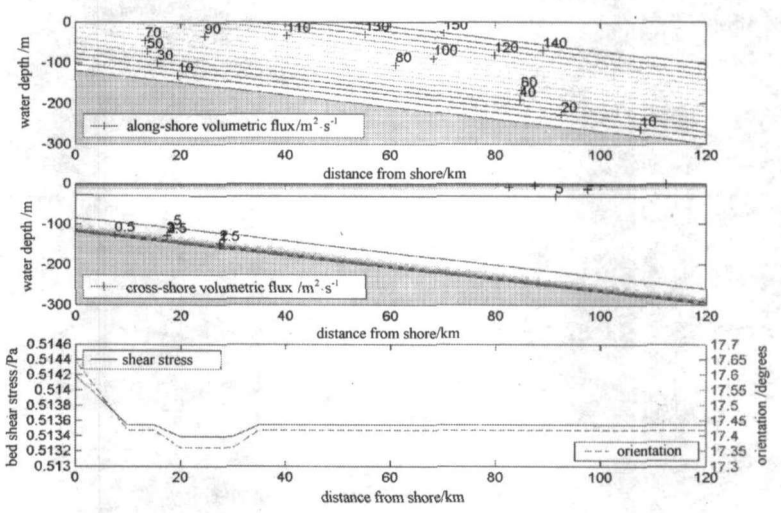

图 6 珠江口盆地流场分布

率做初步估算 (图 7). 当底床砂质以细砂为主时，整个区域处于被侵蚀状态；随着粒径的增加，水深从 130 m 到 150 m，底床处于沉积状态，当水深大约为 170 m 时，底床又开始被侵蚀，当水深大于 180 m 时，底床基本处于平稳状态. 从底沙推移质输移随水深变化曲线来看 (图 8)，中细

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

砂和中砂质泥沙输移量最大. 这一点和实测结果一致.

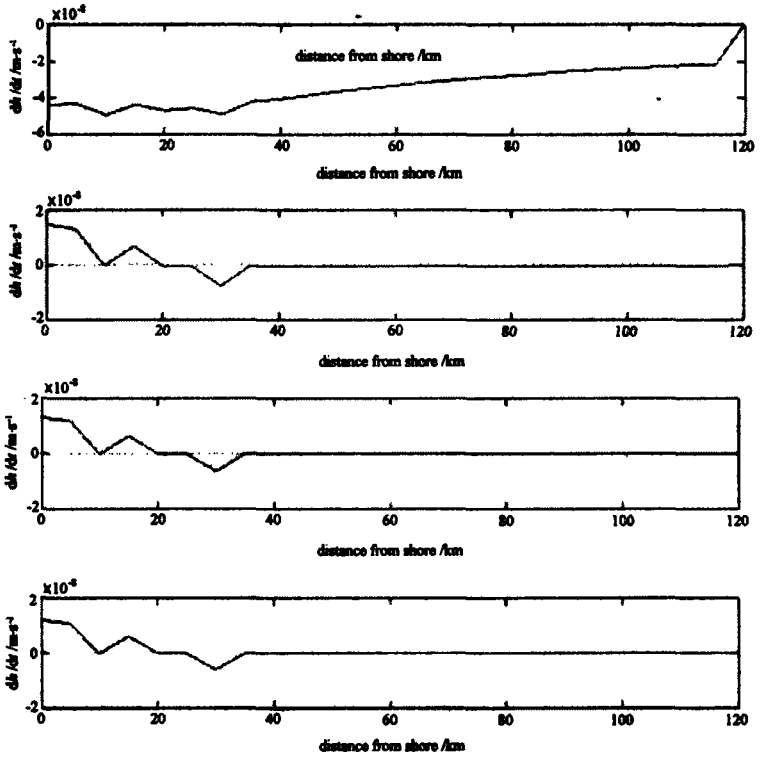

图 7 珠江口盆地底床变形

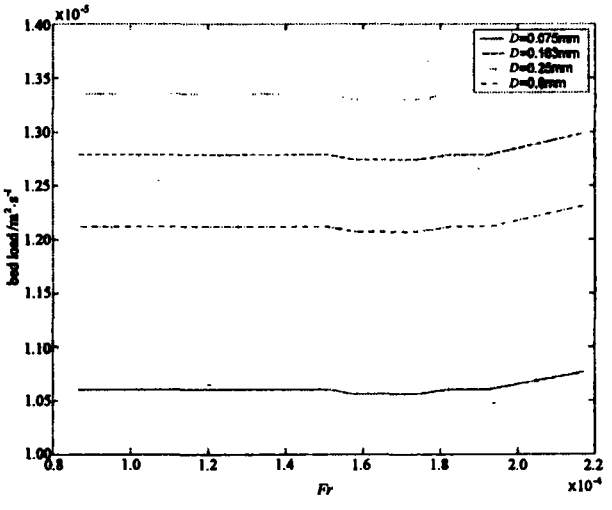

图 8 推移质泥沙输移量随水深变化曲线

3 结 论

我们认为该模型虽然在一定程度上反映泥沙输移的规律，但仍然存在一些问题，比如：该

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

模型无法反映底床坡度对泥沙输移的影响. Bagnold 曾提出海底底坡效应，认为底坡的陡缓影响着底沙的运移效率；该模型仅讨论准二维下泥沙的垂向变化，不能确定泥沙输移方向；该模型仅适合单一粒径的泥沙输移，未能考虑水深、粒径之间的关系；在底床面上再叠加沙波形状后结果如何等等. 对这些问题我们将另文讨论.

参 考 文 献

1 Besio G, et al. Mograting sand waves. *Ocean Dynamics*, 2003, 53: 232~238

2 Cookman J L, Flemings P B. STORMSED1.0: hydrodynamics and sediment transport in a 2-D, steady-state, wind- and wave-driven coastal circulation model. *Computers Geosciences*, 2001, 27: 647~674

3 Csanady G T. Circulation in the costal ocean. D. Reidel Publishing Co. Boston, MA, 1982. 279

4 Gerkema T. A linear stability analysis of tidally generated and waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 417: 303~322

5 Grant W D, Madsen O S. Combined wave and current interaction with a rough bottom. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(C4): 1797~808.

6 Hulscher S J M H. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C5): 9327~9338

7 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

8 Komarova N L, Hulscher S J M H. Linear instability mechanisms for sand wave formation. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 413: 219~246

9 Komarova N L, Newelll A C. Nonlinear dynamics of sand banks and sand wave. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, 415: 285~321

10 Li M Z, Amos C L. SEDTRANS96: the upgraded and better calibrated sediment-transport model for continental shelves. *Computers Geosciences*, 2001, 27: 619~645

11 Nemeth A A, et al. Continental shelf Research. 2002, 22: 2795~2806

12 Yalin M S. An expression for bedload transportation. *Journal of the Hydraulic Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 89(HY3), 221~250

13 王尚毅，李大鸣. 南海珠江口盆地陆架斜坡及大陆坡海底沙波动态分析. 海洋学报， 1994, 16(6): 122~132

14 夏东兴等. 海南东方岸外海底沙波活动型研究. 黄渤海海岸， 2001, 19(1): 17~24

15 庄振业等. 陆架沙丘 (波) 形成发育的环境条件. 海洋地质动态， 2004, 20(4): 5~10

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net