

# 潮流波浪联合输沙及海床冲淤演变的 理论体系与其数学模拟\*

白玉川 顾元棫 蒋昌波

(天津大学河流海岸工程泥沙研究室 天津 300072)

**摘要** 根据近岸带及河口区潮流、波浪、湍流各自物理尺度的不同,从 Navier-Stokes 方程和质量传输方程出发,利用 Reynolds 分解的方法,建立了模拟波浪潮流联合输沙及海床冲淤演变的理论体系,给出了潮流作用下近岸波浪传播方程、波浪作用下潮流运动方程;并通过利用波流合成底部切应力、底层湍流脉动随机特性,得出了波流联合作用下不平衡输沙计算中泥沙起悬与沉降量的确定方法。本文模型应用于“广西合浦围垦工程潮流波浪输沙”、“黄骅港规划一期工程波流计算”等实际工程,结果证明该模型是可行的。

**关键词** 波流联合输沙 不平衡输沙 海床演变

**学科分类号** P731

近岸带海滩及河口区泥沙的运动主要与该区域的水流和波浪状况有关,但由于问题本身的复杂性及数值模拟条件等多方面因素的制约,早期往往根据侧重点的不同,将它们分割开来,形成潮流输沙(林秉南等,1981)和波生流输沙(Komar, 1971)的两大研究体系,而对于波生流又主要集中于沿岸输沙的研究上(Bijker,1971;王尚毅等,1991)。事实上,近岸及河口区的潮流与波生流是不可分割的,并与该区域的波浪泥沙构成了一个耦合系统,如由于涨潮落潮的作用,波浪在海滩及河口的影响区域也随之不断变迁:高潮时,波浪传播的范围广;低潮时,波浪传播的范围小。高潮和低潮时水深差异,将导致破波位置的不同,进而产生不同的波生流系统,同时波浪对床面泥沙作用的强度也有很大区别。此外,潮流和河口径流对波浪传播也具有强烈的折射作用,如流速方向正好与波浪传播方向相反,波高波陡将骤然增加;而当流速方向与波浪传播方向一致时,又将波浪展平。因此,为了能更有效地研究和预报近岸带以及河口区的动力演变过程,有必要考虑潮流、波浪和泥沙综合作用。对于这一方面的研究,取得了一些重要成果(窦国仁等,1995;辛文杰,1997),但在波、流及泥沙综合作用研究方面尚存不足,即只考虑了波浪对流速的影响,而未涉及流速和潮位变化对波浪传播的作用,因此未能做到完全的潮流与波浪联合输沙。作者在考虑近岸带及河口区动力特征与水流内部湍流结构特征的前提下,建立了潮流和

\* 国家自然科学基金项目,59809006号;天津市21世纪青年基金项目,983702011号;华东师范大学河口海岸国家重点实验室开发基金项目,99001号。白玉川,男,出生于1967年8月,博士,副教授,硕士生导师,Fax: 0086-022-23358329

收稿日期:1998-10-15,收修改稿日期:1999-09-10

波浪联合输沙理论体系, 进而对潮流波浪联合输沙、海床冲淤演变进行数值模拟。

## 1 理论体系

从 Navier-Stokes 方程和质量传输方程为出发, 利用类似 Reynolds 分解的方法, 根据潮流、波浪、湍流脉动(拟序、随机)各自运动尺度的不同, 将方程中的各物理量分解为与之相关的部分, 然后在不同的尺度下进行积分平均, 导出各运动方程。

### 1.1 波浪作用下的积深浅水环流方程

水流连续方程

$$\frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

x 向水流运动方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial z}{\partial x} + fv - \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} \quad (2)$$

y 向水流运动方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) = -g \frac{\partial z}{\partial y} - fu - \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} \quad (3)$$

其中  $c_s = \frac{h^{1/6}}{n}$ ,  $c_s$  为水流谢才系数;  $x, y$  为空间坐标;  $t$  为时间;  $z$  为水位;  $z_0$  为床面高程;  $u, v$  为流速在  $x, y$  向上分量;  $h$  为水深;  $f = 2wsin\Phi$ , 柯氏力;  $\Phi$  为地球纬度;  $g$  为重力加速度;  $S_{xy}, S_{yx}, S_{xx}, S_{yy}$  为辐射应力;  $n$  为水力曼宁系数。

### 1.2 流速和潮位变化作用下的波浪传播计算模式

考虑到一般河口港湾的范围都比较广阔, 为几十到上百公里, 与波浪波长相比是一个量级很大的数, 从现阶段计算机速度和容量, 对在这样大海域内的波浪传播, 直接利用流场作用下的浅水波方程进行数值模拟(白玉川, 1995)还不现实, 因此, 作者采用射线理论的方法(白玉川, 1996)来模拟研究, 与常规计算波浪传播方法相比, 本文还计算了海区潮流流速和潮位变化对波浪传播的影响。

#### 1.2.1 波浪计算模式的基本方程 波浪运动学守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{K} + \Delta[\delta(\vec{K}) + \vec{K} \cdot \vec{U}] = 0 \quad (4)$$

波浪动力学守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{E}{\delta} \right) + \Delta \left\{ (\vec{U} + \vec{C}_g) \frac{E}{\delta} \right\} = 0 \quad (5)$$

其中:  $\vec{K}$  为波数,  $E$  为随体坐标系下, 波浪在一个周期内的平均能量,  $\vec{C}_g$  为波浪群速度,  $\delta(\vec{K})$  为波浪固有频率,  $\vec{U}$  为流速。

以上述两个方程为基础, 经一系列变换可得:

波向线方程:

$$\frac{D\alpha}{DS} = -\frac{1}{C_a} \cdot \frac{DC_a}{Dn} \quad (6)$$

波作用量近似守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial s} (|\vec{U}| \cos \gamma + C_g) \frac{E}{\delta} = 0 \quad (7)$$

其中  $\alpha$  为波向角,  $C_a$  为绝对波速,  $\gamma$  为流速与波浪传输方向的夹角,  $(S, n)$  代表波的线及其法线方向。

波向线散开因子方程:

$$\frac{D^2 \beta}{Dt^2} - \frac{D\beta}{Dt} \cdot \frac{DC_a}{DS} + \beta \cdot C_a \frac{D^2 C_a}{Dn^2} = 0 \quad (8)$$

式中  $\beta$  为波向线散开因子。

**1.2.2 波浪各要素的求法** 根据波浪运动学守恒方程可得波向线任意点处波浪各要素:

频率  $\delta_i = \delta_0 - \vec{K} \cdot \vec{U}_i$ , 其中  $\delta_0$  为深水处波浪频率。

波速  $C^2 = (C_a - \vec{K} \cdot \vec{U} / |\vec{K}|)^2 = \frac{g}{K} Kth(Kh)$ 。

波向角 通过波向线方程(8)求出。

波高  $H_i = K_r \cdot K_s \cdot K_b \cdot K_d \cdot H_0$ 。

其中,  $K_r$  为折射系数,  $K_r = |\beta|^{-1/2}$ , 解波向线散开因子方程求得;  $K_s$  为浅水变形系数;  $K_b$  为频率变化系数, 亦称 Doppler 系数;  $K_d$  为绕射系数;  $K_f$  为摩阻引起的波能损失系数。

**1.2.3 波浪破碎标准** 取  $H_f \leq 0.78 H_b$  作为破波标准, 当波浪破碎后, 引入波浪破碎的能量耗散项进行模拟波浪一次、二次等破碎情况。

### 1.3 泥沙输运方程

流体中另一介质(悬沙)的质量守恒方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial US}{\partial x} + \frac{\partial VS}{\partial y} + \frac{\partial WS}{\partial z} = S_\phi \quad (9)$$

根据潮流、波浪、湍流脉动(拟序、随机)各自运动尺度的不同, 将方程中速度、含沙量分解为与之相关的部分:

$$\left. \begin{aligned} u &= U + U_w + U_{tc} + U_{ts} \\ V &= V + V_w + V_{tc} + V_{ts} \\ w &= W - \omega + W_w + W_{tc} + W_{ts} \\ s &= S + S_w + S_{tc} + S_{ts} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中,  $(U, V, W, S)$  代表与潮流相关的速度及含沙量; 其带下标  $w$  的量代表与波浪相关的速度及含沙量; 带下标  $tc, ts$  的量代表与湍流拟序和随机脉动相关的速度及含沙量;  $\omega$  代表泥沙的沉降速度。然后将(10)式代入(9)式, 并在不同的尺度下进行积分平均, 导出泥沙输运方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial US}{\partial x} + \frac{\partial VS}{\partial y} + \frac{\partial (W - \omega)S}{\partial z} + \frac{\partial U_w S_w}{\partial x} + \frac{\partial V_w S_w}{\partial y} + \frac{\partial W_w S_w}{\partial z} \\ + \frac{\partial U_{tc} S_{tc}}{\partial x} + \frac{\partial V_{tc} S_{tc}}{\partial y} + \frac{\partial W_{tc} S_{tc}}{\partial z} + \frac{\partial U_{ts} S_{ts}}{\partial x} + \frac{\partial V_{ts} S_{ts}}{\partial y} + \frac{\partial W_{ts} S_{ts}}{\partial z} = S_\phi \end{aligned} \quad (11)$$

对于运动的泥沙,从水深方向来看,至少应分为两层,即对于沙质海滩,则有悬移运动层——悬移质,推移运动层——推移质;对于淤泥质海滩,悬移运动层——悬移质,流移运动层——浮泥层;它们的分界高度称之为床面层厚度,因此,沿水深积分(11)式时,应从该高度积起,然后引入湍流脉动(拟序、随机)扩散系数,波动扩散系数,则泥沙扩散方程变为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(S_h)}{\partial t} + \frac{\partial(hUS)}{\partial x} + \frac{\partial(hVS)}{\partial y} = S_{\phi}h + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\xi_{ic} + \xi_{is} + \xi_w) \frac{\partial S}{\partial x} h \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (\xi_{ic} + \xi_{is} + \xi_w) \frac{\partial S}{\partial y} h \right] + P - D \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $\xi_{ic}$ 、 $\xi_{is}$  为湍流拟序、随机紊动扩散系数,  $\xi_w$  为波动扩散系数,  $D$  代表潮流波浪及重力作用下泥沙在床面上的沉降总量;  $P$  代表潮流波浪及重力作用下泥沙在床面上的冲起总量; 而“ $P-D$ ”代表泥沙在床面上的交换情况。当  $P > D$  时,海床发生冲刷,水流中泥沙含量将逐渐增大; 当  $P < D$  时,海床发生淤积,水流中泥沙含量将逐渐减小; 当  $P = D$  时,海床不冲刷不淤积,水流中泥沙含量处于相对平衡状态,因此“ $P-D$ ”也称之为冲淤函数。

### 1.3.1 泥沙在床面上冲起总量的确定

$$P = \alpha_p C_{bi} \cdot 0.83 \beta(Z^+) U_{T*} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-0.5\alpha_1^2) - \alpha_1 \cdot (1 - \Phi'(\alpha_1)) \right\} \quad (13)$$

$C_{bi}$  为床面底部第  $i$  组粒径泥沙可活动的体积含沙量,  $\Phi'$  为误差函数,  $\alpha_1 = \omega / \sigma_v$ ,  $\sigma_v$  为沙粒在床面层附近脉动速度的方均根值,它与底部摩阻速度  $U_{T*}$  呈如下函数关系

$$\sigma_v = 0.83 U_{T*} \beta(Z^+)$$

$$\beta(Z^+) = \begin{cases} 1 - (Z^+ - 50)^2 / 2500, & Z^+ < 50 \\ 1, & Z^+ \geq 50 \end{cases}$$

$Z^+ = U_* \cdot \delta / \gamma$ ,  $\delta$  为床面层高度;  $U_*$  为潮流摩阻流速,  $U_{*T}$  为潮流与波浪合成摩阻流速;  $\alpha_p$  为一比例系数,参照量纲分析(Garcia *et al.*, 1990),  $\alpha_p$  应为  $R_p$  的函数:  $R_p = \sqrt{gD_s} \cdot D_s / \gamma$ ,  $\alpha_p = 0.001 \ 35 R_p^{0.53}$ ,  $D_s$  为泥沙粒径,  $\gamma$  为浑水粘滞系数。

### 1.3.2 泥沙在床面上的沉降总量的确定

$$D = \Phi_B \cdot \omega \cdot S \quad (14)$$

$\Phi_B$  为修正系数,可根据泥沙沿水深的垂向分布情况确定。

### 1.3.3 潮流与波浪合成摩阻流速的确定

$$U_{*T}^2 = (u^2 + v^2) / C_s^2 + f_w U_0^2 / 4 \quad (15)$$

$U_0 = \frac{\pi H}{Tsh \frac{2\pi h}{L}}$  为波浪底部最大轨迹流速,  $H$  为波高,  $T$  为波周期,  $L$  为波长,  $f_w$  为波浪阻力系数,其值为

$$f_w = \begin{cases} \exp[-5.977 + 5.213(\alpha_b / \gamma_*)^{-0.194}], & 1.47 \leq \alpha_b / \gamma_* < 3\ 000, \\ 0.32, & \alpha_b / \gamma_* \leq 1.47 \end{cases}$$

$\alpha_b = \frac{H}{2} \left( sh \frac{2\pi h}{L} \right)^{-1}$  为近底波浪质点振幅;  $\gamma_* = 120d_{50}$  为床面粗度;  $d_{50}$  为床面泥沙中径。

**1.3.4 湍流拟序、随机紊动扩散系数及波动扩散系数的确定** 湍流拟序、随机紊动扩散系数  $\xi_{tc}$ 、 $\xi_{ts}$  以及波动扩散系数  $\xi_w$  是目前流体力学湍流理论研究的焦点, 尚无定论, 一般通过湍流模式理论或经验公式确定。本文的处理方法将三者合为一体, 即取:  $\xi_{Tcs} = \xi_{tc} + \xi_{ts} + \xi_w$ , 通过修正湍流  $K-\epsilon$  模式方程确定, 但需要指出的是, 将扩散系数分为三项, 具有重要的理论和实际意义, 有必要沿着该途径进行深入探讨。

#### 1.4 海床演变方程

$$C_m \frac{\partial z_0}{\partial t} + (D - P) = 0 \quad (16)$$

$z_0$  为床面高程;  $c_m$  为浑水保持流体特性的最高含沙量 (相对体积比)。

### 2 泥沙动水沉速的确定

对于一般的河口海域, 其泥沙均为细颗粒粘性泥沙, 因此, 泥沙沉速应取其絮凝沉速; 同时泥沙在沉降过程中还受动水 (潮流、波浪) 的影响, 故采取动水絮凝沉速。根据大量试验和现场实测, 动水絮凝沉速可近似表示为细颗粒泥沙代表粒径  $d_{50}$  的函数 (王尚毅等, 1990)

$$w_b = w_0 f(d_{50}) \quad (17)$$

$w_0$  为泥沙静水沉速, 可查阅有关文献 (沙玉清, 1956);  $w_b$  为泥沙动水沉速。

### 3 不冲不淤流速的确定

对于泥质河床, 根据床面含沙量的不同, 可分为固性床面和塑性床面两种, 区分它们的标志是床面的极限含沙量  $C_m$ 。

$$C_m = 0.755 + 0.222 \log_{10} d_{50} (d_{50} \text{ 以 mm 计}) \quad (18)$$

设  $C_b$  为床面含沙量, 当  $C_b < C_m$ , 床面为塑性床面; 当  $C_b \geq C_m$ , 床面为固性床面。固性床面泥沙的起动, 仍然遵循“薛尔兹”曲线, 起动规律

$$\frac{\tau_c(\gamma_s - \gamma_0)}{d} \sim \frac{u_* d}{\gamma} \quad \text{不冲流速: } U_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\rho}} \quad (19)$$

塑性床面泥沙的起动以界面波失稳破坏的形式发生, 大量试验表明, 主要与床面活动泥层及床面上层浑水的非牛顿 (宾汉) 切应力有关, 简化处理的方法是将二者进行叠加,

$$\tau'_{*c} = \tau_{B\text{床面}} + \tau_{B\text{浑水}}, \quad \text{不冲流速: } U'_{*c} = \sqrt{\frac{\tau'_{*c}}{\rho}} \quad (20)$$

宾汉切应力与床面泥层容重有关, 故不冲流速又可表示为容重  $\gamma$  的函数关系 (洪柔嘉等, 1988)。不淤流速, 本文中采用工程界较为常用的、经过大量实测资料验证的沙玉清公式 (沙玉清, 1956)

$$U_s = 0.812 d^{2/5} \omega^{1/5} R^{0.2} \quad (21)$$

式中  $U_s$  代表不淤流速;  $d$  为泥沙粒径;  $\omega$  为泥沙沉速;  $R$  为水力半径, 计算中取水深  $H$ 。

## 4 数学模拟方法

### 4.1 流场的数值模拟

**4.1.1 流场有限元方程** 在直角坐标系下, 取与  $x$  和  $y$  轴平行的平面, 然后利用三角形网格剖分所取平面, 令  $\Phi_i$  为线性三角元的坐标函数, 则本文所取插值函数为

$$\begin{aligned} u &= u_i(t) \Phi_i(x, y) \\ v &= v_i(t) \Phi_i(x, y) \\ z &= z_i(t) \Phi_i(x, y) \end{aligned} \quad (22)$$

将(22)式代入式(1)–(3), 得有系数矩阵型有限元方程

$$A \frac{\partial z}{\partial t} + B_1(t)h + B_4u + C_2(t)h + C_4v = 0 \quad (23)$$

$$A \frac{\partial u}{\partial t} + B_1(t)u + C_1(t)v - fAv + D_1z + A \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \right] + A \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} = 0 \quad (24)$$

$$A \frac{\partial v}{\partial t} + B_2(t)u + C_2(t)v + fAU + D_2z + A \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \right] + A \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} = 0 \quad (25)$$

式中  $A, B_1, C_1, B_2, C_2, B_4, C_4, D_1, D_2$  为系数矩阵, 采用质量集中法, 并把与  $x$ - $y$  轴平行平面内所有三角形单元进行叠加, 除  $D_1, D_2$  外, 其它单元矩阵均可叠加为对角阵。

**4.1.2 时间方向的差分离散和半隐格式** 采用半隐差分格式, 先利用  $u^n, v^n$  和  $z^n$  通过离散式(24)和(25), 求出计算平面上的  $u^{n+1}$  和  $v^{n+1}$  值

$$\begin{aligned} Au^{n+1} &= [A - \Delta t B_1(n\Delta t)]u^n - [C_1(n\Delta t) \cdot \Delta t - \Delta t f A]v^n - \Delta t D_1 z^n - \\ &A \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \right] \Delta t - \left[ A \frac{gu\sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} Av^{n+1} &= [-\Delta t f A - \Delta t B_2(n\Delta t)]u^n - [C_2(n\Delta t) \cdot \Delta t - A]v_n - \Delta t D_2 z^n - \\ &A \left[ \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \right] \Delta t - \left[ A \frac{gv\sqrt{u^2 + v^2}}{c_s^2 h} \right] \Delta t \end{aligned} \quad (27)$$

再利用  $U^{n+1}$  和  $V^{n+1}$  通过离散式(18), 求出  $z^{n+1}$  值, 即

$$Az^{n+1} = Az^n - [\Delta t B_1(n\Delta t) + \Delta t C_2(n\Delta t)]D^n - [\Delta t B_4(n\Delta t)U^{n+1} + \Delta t C_4(n\Delta t)V^{n+1}] \quad (28)$$

## 4.2 含沙浓度场的数值模拟

为保证含沙浓度场的计算精度, 同时考虑涨、落潮流的实际背景, 采用集中质量迎风有限元素方法。

首先, 将泥沙扩散方程(12)转化为非守恒型, 取插值函数

$$S = S_i(t) \Phi_i(x, y) \quad (29)$$

采用 Galerkin 方法, 方程可写为

$$A_i \left( \frac{dS}{dt} \right)_i = - \sum_{j=1}^N \int_{\Omega} \xi_{TCr} \nabla \Phi_i \cdot \nabla \Phi_j d\Omega S_j + A_i [S_{\phi} + (P - D) / h]_i \quad (30)$$

然后在计算节点  $P_i$  的相关单元中寻找其迎风单元, 并将  $\frac{dS}{dt}$  在迎风单元上离散, 设  $(x_i, y_i)$ 、 $(x_{i\beta}, y_{i\beta})$ 、 $(x_{i\gamma}, y_{i\gamma})$  为节点  $P_i$  迎风单元  $e_i$  的三个顶点坐标,  $\Delta_i$  为迎风单元  $e_i$  的面积。

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_i^n = \left(\frac{S^{n+1} - S^n}{\Delta t}\right)_i^n + (V \cdot \nabla S)_i^n = \left(\frac{S^{n+1} - S^n}{\Delta t}\right)_i^n + a_{ii}^n S_i^n + a_{ii\beta} S_{ii\beta}^n + a_{ii\gamma} S_{ii\gamma}^n$$

其中:  $a_{ii} = \frac{1}{2\Delta_i} [u_i^n(y_{i\beta} - y_{i\gamma}) + v_i^n(x_{i\gamma} - x_{i\beta})]$ ,

$$a_{ii\beta} = \frac{1}{2\Delta_i} [u_i^n(y_{i\gamma} - y_i) + v_i^n(x_i - x_{i\gamma})],$$

$$a_{ii\gamma} = \frac{1}{2\Delta_i} [u_i^n(y_i - y_{i\beta}) + v_i^n(x_{i\beta} - x_i)]$$

这样,由(30)可得

$$S_i^{n+1} = S_i^n [1 - (a_{ii} + b_{ii})] - \sum_{k=1}^{n_i} (a_{iik} + b_{iik}) \cdot \Delta t S_{ik}^n + [S_\phi + (P - D) / h]_i^n \cdot \Delta t \quad (31)$$

$P_{ik}(k = 1, 2, \dots, n_i)$ 为  $P_i$ 的相关节点,其中

$$a_{iik} = a_{ii\beta} \cdot \delta_{ika\beta} + a_{ii\gamma} \cdot \delta_{iki\gamma} b_{iik} = \sum_{e=1}^E \int_{\Delta} \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{\lambda=1}^3 (\xi_{TCS} \nabla \Phi_e^\alpha \cdot \nabla \Phi_e^\lambda) d\Omega \Delta_{\alpha i}^e \cdot \Delta_{\lambda i}^e / A_i$$

这里,  $E$ 代表  $P_i$ 节点的相关单元总数。

### 4.3 海床演变的数值模拟

对于海床演变方程(16),利用向前差分离散床面变化项,然后代入方程,整理得

$$z_0^{n+1} = z_0^n + [(P - D) / C_m]_i^{n+1} \cdot \Delta t \quad (32)$$

## 5 应用实例

本文理论和数值模拟方法,曾应用于“广西合浦廉州湾围垦工程波浪水流泥沙输移”及“黄骅港规划一期工程波流计算”等实际工程计算中,为了能系统地说明理论的应用情况,本文主要选取“合浦围垦工程”加以示例。

### 5.1 流场流速与潮位变化对实际海区波浪传播影响的模拟计算

在实际潮流波浪藕合计算时,将一潮位周期划分为若干小的时间段(仍远大于波浪的传播周期),在每一小的时间段内,取流速和水深的平均值,计算其对波浪传播的影响,而后再利用辐射应力的概念,考虑波浪对流场的影响,迭代计算出流速与水位的数值等。

本文计算波浪潮流耦合变形时,亦采用上述步骤进行其理论模式的详细描述和检验(白玉川等,1996)。“广西合浦廉州湾围垦工程波浪水流泥沙输移”工程计算范围见图1。考虑流速及水深变化影响,给出波浪在一个潮流涨落周期内波向线的变化情况(图2)。从图2中可以看出,1991年7月27日7时与7月28日8时的波向线分布基本相似,说明海区波向线随着海潮的周期涨落也会发生周期

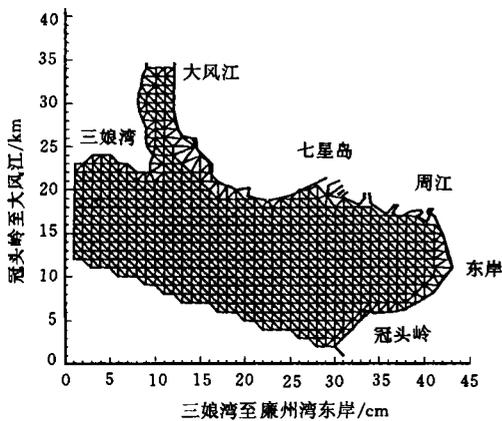


图1 计算范围和计算网格

Fig.1 Calculation scope grids

性变化,这与实际波浪传播情况是相符的,而以往的波浪计算模式很难得到这样的结果。

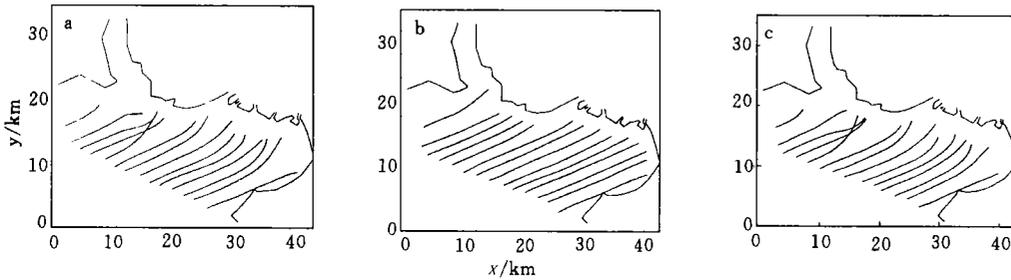


图2 1991年7月27日07:00(a)和18:00(b)及7月28日08:00(c)时波向线

Fig.2 Wave rays at 07:00(a) and 18:00(b) in July 27 and at 08:00(c) in July 28, 1991

“黄骅港规划一期工程波流计算”考虑了波浪出现的频率。在计算区域的海相边界上,按七号石油平台处的波浪玫瑰图(图 3a)分布,从 16 个方位引入波浪,并考虑典型潮流速度与潮位变化对其影响,通过本文模式对波浪的浅水变形及折射计算,然后考察传播到七号平台及大口河处波浪的分布状况,与两地实际波浪统计结果进行比较,见图 3a、b。从图 3 中可以看出,七号平台处波浪计算值与实际统计值较为吻合,说明从计算域海相边界到七号平台处,从统计意义上来讲波浪变形不大,基本保持原状;而大口河处波浪的计算结果也基本反映了实际波浪统计情况。这些结果进一步说明采用本文波浪计算模式,考虑潮流对波浪的影响是符合实际情况的。

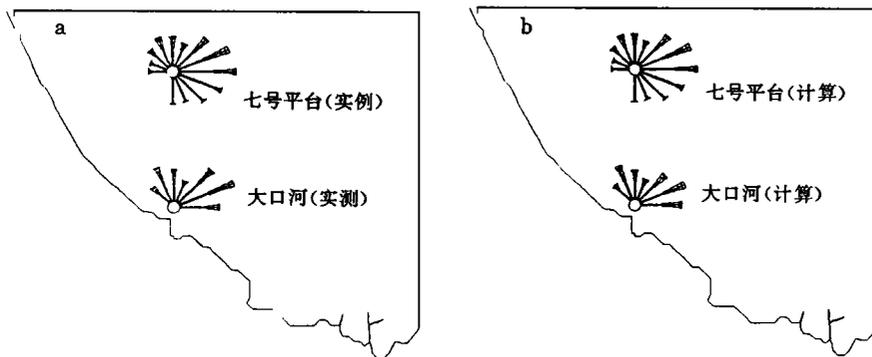


图3 大口河海区实测(a)和验证(b)波浪玫瑰图

Fig.3 Wave roses of measured (a) and calculated (b) results for Dakouhe Estuary sea region

## 5.2 流场、含沙浓度及海床变形验证计算

为检验本文理论及数学模拟的实际应用情况,重点对“广西合浦廉州湾水域潮流及输沙”进行实际模拟计算。

**5.2.1 模型计算范围及网格剖分** 廉州湾地处北部湾顶,北海市区北侧,湾口朝西呈半开敞。本文所模拟范围西起三娘湾,东至廉州湾东岸,南始北海冠头岭,北至大风江,东西范围为 41km,南北范围为 34km,其中包括南流江在七星岛东西两侧的两个人海口,南西、南东水道及周江入海口。为了使计算能更好地适合该水域复杂的海岸、河口边界,本文采

取三角形网格剖分计算区域(图1)。

**5.2.2 模拟计算的方法及计算结果** 根据建立数学模型的一般方法,首先需结合现场实测资料对所建数学模型进行合理调试,确定海床各点的糙率 $n$ 值,然后在保持糙率不变的情况下,再选取典型资料进行验证计算,检验所建模型的实际应用情况。本文遵循这一原则,通过选取两组典型的周日连测资料,确定海床各点的糙率 $n$ 值和检验模型的应用情况。具体做法如下:(1)采用1991年6月15日09:00—16日17:00三娘湾站、冠头岭站的逐时潮位资料作为海域开边界;七星岛断面、南西和南东水道、周江河口断面的逐时水位或流量作为入海河口的控制边界,然后对水域潮流进行调试计算,通过检验4个验证点潮位、流速计算与实测值的差异,使其满足一定的精度,从而确定海床各点的糙率。(2)在调试的基础上,保持海床各点糙率不变,换用1991年7月27日7:00—28日15:00相应的潮

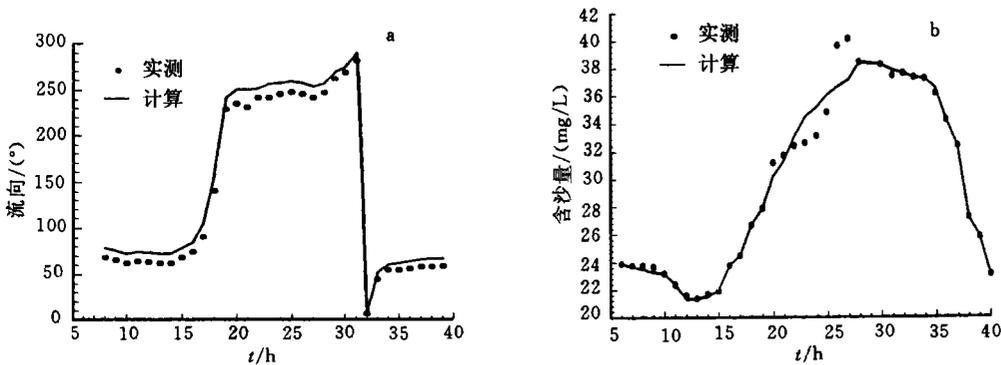


图4 流速方向过程(a)和含沙量过程(b)验证曲线

Fig.4 Verifications of current velocity(a) and sediment concentration(b)

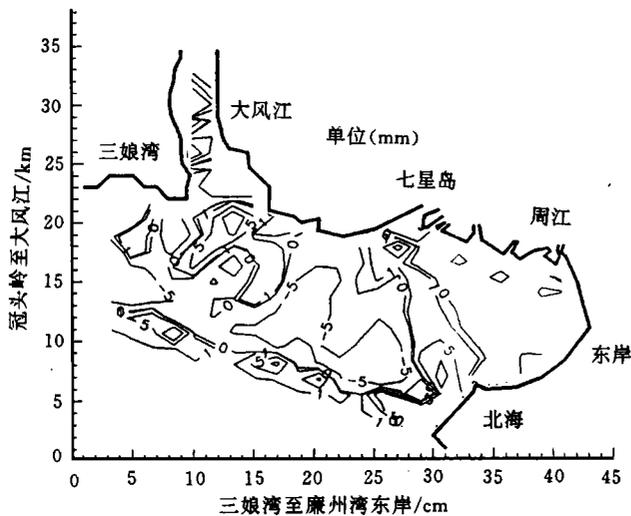


图5 床面冲淤演变强度计算结果

Fig.5 Computational result of bed accretion and crosion

位资料对水域潮流进行模拟计算,考虑波流的耦合作用,检验4个验证点相应潮位、流速及含沙量过程计算值与实际测量值的吻合情况。域内4个验证点坐标分别为:1(21,4),2(27,8),3(36,8),4(33,6),单位:km。由于篇幅所限,现仅给出一组测点(3号点)的潮位、流速、平均含沙量过程验证曲线如图3和图4。

**5.2.3 海床冲淤演变强度** 海区海床的冲刷和淤积涉及到多种自然和非自然因素,有些是确定的,有些又是随机的。因此,作为海区的主要及长时间(经常)出现的动力因素——典型潮潮流和常规波浪,根据其动力作用机理,按照一定的理论推算预测海床的演变情况,总体来讲,可给出大致的冲淤演变趋势。根据这一原则,在本文计算中,为了定性验证理论,作者重点对“广西合浦廉州湾水域典型潮流及常规波浪联合输沙”引起的海床演变进行模拟计算,结果见图5。

## 6 结语

**6.1** 由以上计算结果可以看出,各验证点潮位、平均流速及含沙量过程的计算值与实测值吻合较好。

**6.2** 由涨、落潮流场计算可以看出,涨急时湾内流向为逆时针旋转,落急时流向为顺时针逆旋转方向,这与实际情况<sup>1)</sup>是相符的。

**6.3** 从图5可以看出,北海港附近基本处于不冲不淤的平衡状态,这与实际情况也是相符的。

综合以上所述,本文计算结果与廉州湾内潮流泥沙运动状况基本吻合,说明本文理论及模拟方式是正确可行的,可进一步应用于其它工程预报计算。

**6.4** 需进一步建立“考虑大尺度拟序结构的湍流模式”,以确定海区水流紊动粘滞系数、泥沙输运扩散系数。

**6.5** 实际海域中,波浪均为随机波浪,应进一步研究随机波浪与潮流的相互作用及随机波浪与潮流的共同输沙机理。

**6.6** 作为工程预报的手段,建立泥沙数学模型预报海岸的消长、海床的冲淤演变、港池的回淤等。由于动力因素复杂,确定性与不定性共存,因此,应进一步开展“海区泥沙数学模型及可信度”的研究,在给出预报结果的同时,亦能给出结果发生的概率,也就是预报结果在实际中的可信度。

## 参 考 文 献

- 林秉南,黄菊卿,李新春,1981. 钱塘江河口潮流输沙数学模型. 泥沙研究, (2): 17—27  
王尚毅,顾元桢,郭传真,1990. 河口工程泥沙数学模型. 北京:海洋出版社,96—106  
王尚毅,周本凡,1991. 沿岸输沙率计算. 海洋学报, 13(5): 692—702  
窦国仁,董凤舞,窦希兵,1995. 潮流和波浪的挟沙能力. 科学通报, 40(5): 443—446  
辛文杰,1997. 潮流波浪综合作用下河口二维悬沙数学模型. 海洋工程, 15(2): 30—47  
白玉川,1995. 流和潮位变化作用下浅水波方程的理论推导及数值模拟. 邵维文等主编. 第一届海事技术研讨会文集. 上海:上海科学技术文献出版社,44—47  
白玉川,李世森,1996. 不平衡输沙泥沙起悬与沉降量的确定. 海洋通报, 15(6)42—49  
沙玉清,1956. 泥沙运动力学. 北京:机械工业出版社,40—229

1) 广西合浦县水利局,1991. 广西壮族自治区合浦县海河堤工程加固整治与滩涂开发报告

- 洪柔嘉, 应永良, 1988. 水流作用下的浮泥起动流速试验研究. 水利学报, (8): 49—55
- Garcia M, Parker G, 1990. Entrainment of bed sediment into suspension. J Hydr Eng, 17(4):414—435
- Komar P D, 1971. The mechanics of sand transport on beaches. J Geophys Res, 76(3): 713—721
- Bijker E W, 1971. Longshore transport computations. Coast and Ocean Engrg, 98(4): 546—601

## THEORETICAL SYSTEM OF SEDIMENT TRANSPORT BY COMBINED TIDAL CURRENTS AND WAVES AND MATHEMATICAL MODEL OF SEA BED ACCRETION AND EROSION

BAI Yu-chuan, GU Yuan-yan, JIANG Chang-bo

(*Institute of Sedimentation on River and Coast Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072*)

**Abstract** According to the differences among physical scales about tide current, wave and turbulence in nearshore zone and estuary, from Navier-Stokes equations and transport equation in fluid mechanics, the flow field and sediment diffusion equations are deduced by using Reynolds decomposition method, a theoretical system of sediment transport by combined wave-tide current and sea bed evolution due to sediment accretion and erosion is proposed. Controlling equations include: 1) tide current equations under the effecting of waves; 2) wave propagation equations under the effecting of variance of tide level and velocity; 3) sediment diffusion equations transported by waves and tide current; 4) sea bed evolution equations; 5) through composing the shear stress of wave-current and considering the random characters of pulsation and coherent structure in near sea bed turbulence, the quantities function of suspended sediment picked up from and deposited on the bed are determined on the basis of the probability and statistics method. As a practical application, this nonequilibrium sediment mathematical model was used to Engineering of Enclosing Tide Land for Cultivation in Hepu District in Guangxi Zhang Autonomous Region and Wave-Tide Current Combined Calculation in Huanghua Harbour in Hebei Province. The obtained results are satisfactory.

**Key words** Sediment transport by combined wave and tide current    Nonequilibrium sediment  
Sea bed evolution

**Subject classification number** P731