

甬江建闸前后冲淤特性的初步数值模拟

蒋建华 苏纪兰

(国家海洋局第二海洋研究所, 杭州)

摘 要 本文建立了纵向一维和垂向二维两种泥沙运动数值模式, 以模拟甬江建闸前后泥沙冲淤规律. 模式成功地进行了三汊点(即宁波三江口)水力、盐度、泥沙要素的计算. 应用一维模式计算, 对甬江建闸前后泥沙冲淤特性及动力机理作了探讨分析; 垂向二维的计算结果, 说明了泥沙的垂向效应及其对冲淤的影响程度. 模式结果也反映建闸后涨潮流阶段泥沙过饱和淤积状态加强, 落潮流阶段泥沙次饱和冲刷状态减弱, 此是造成甬江大量淤积的主要原因.

关键词 挡潮闸 涨落潮流 泥沙搬运和冲淤 数值模拟

前 言

挡潮闸是沿海地区的重要工程之一. 我国多数挡潮闸都建在湖源海相和陆海双相河口^[1], 建闸后流域来沙多在闸上淤积, 但海相来沙基本不变. 由于水动力条件和泥沙运动特征的改变, 引起河口淤积过程的一系列变化, 其中挡潮闸至河口的引河段回淤最为显著. 动力地貌的分析表明^[2], 建闸后闸下引河淤积的原因在于: (1) 下泄径流的减少; (2) 纳潮量的下降; (3) 潮波变形. 此三种因素是互有关联的.

甬江挡潮闸建于1959年, 位于甬江上游支流的姚江口(见图1). 建闸后姚江闸下河段及甬江河床发生严重淤积. 为了解决甬江的淤积问题, 许多学者在实测统计资料和河相关系的基础上, 对促成甬江闸下引河严重淤积的原因进行过充分的探讨和研究, 普遍认为其主要原因是建闸后纳潮量的急剧减少^[3]. 本文利用数值模拟方法探讨了甬江建闸前后水动力和泥沙冲淤特性, 并对建闸后引河段严重淤积的动力机理作了分析, 结果与前人的结论一致.

因受经费限制, 本文中未进行长时间尺度的模拟, 建闸后只模拟了建闸初断面未经调整时的情况, 所以未能反映建闸后随着断面的调整所引起的冲淤变化的规律问题.

1 理论方程

1.1 基本方程

甬江河道窄长, 横向变化小, 所以可以把三维水动力方程及盐度、泥沙扩散方程进行横向积分简化而得垂向二维方程^[4,5].

水位、流速和盐度的边界条件是通常采用的^[4], 至于泥沙边界条件, 在自由表面 ($y=\zeta$), 其通量为零, 即:

$$W_s C + D_v \frac{\partial C}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

式中, C 为悬沙浓度, W_s 为悬沙沉速, D_v 为垂向物质传递系数, y 为垂向坐标, 在底部 ($y=-y_b$), 泥沙通量等于床面泥沙总冲淤量, 即:

$$(W_s C + D_v \frac{\partial C}{\partial y})_b = \dot{m}_d - \dot{m}_e, \quad (2)$$

式中, \dot{m}_d 为单位时间内悬沙淤积量, \dot{m}_e 为单位时间内床沙冲淤量.

由于甬江的层化不强, 经垂向积分的纵向一维方程也可以用来模拟甬江的冲淤过程. 事实上, 在数值处理垂向二维方程时要用到一维模式. 本文的分析主要依据一维模式的结论, 具体方程见林秉南等人的文章^[6]. 一维模式不考虑水平斜压的影响

1.2 泥沙沉降及冲淤模式

甬江河床的泥沙主要是细粉砂, 中值粒径为 $15\mu\text{m}$. 悬移质中值粒径为 $10.9\mu\text{m}$, 其中小于 $10\mu\text{m}$ 泥沙占32%¹⁾. 可见悬移质中粘土含量占较高的比例, 根据泥沙在咸水中的絮凝特性^[7], 甬江泥沙有一定的絮凝作用. 决定絮凝沉速大小的因素很多, 但在一定的条件下取絮凝沉速在整个河道中为常数是可行的^[8]. 本文参考罗肇森^[9]的试验值, 取絮凝沉速为 $4.5 \times 10^{-4} \text{m/s}$ (相应的单颗粒沉速为 10^{-4}m/s).

由以上分析知, 甬江悬沙的絮凝作用不是很强, 其絮凝因子只有4.5左右. 所以可以借鉴单颗粒泥沙的冲淤模式. 床面冲淤量为^[10]:

$$\dot{m}_d - \dot{m}_e = \alpha W_s (C_b - C_b^{\infty}), \quad (3)$$

而单位时间内床沙的冲淤厚度 h_t , 则按下式计算:

$$h_t = \frac{1}{\rho_t} \alpha W_s (C_b - C_b^{\infty}), \quad (4)$$

式中, α 为泥沙沉降概率, C_b 为底层悬沙含量, C_b^{∞} 为底部平衡输沙浓度, ρ_t 为床沙干容重.

在纵向一维模式中, 冲淤量由下式确定^[11]:

$$\dot{m}_d - \dot{m}_e = \alpha W_s (T_1 \bar{C} - T_2 C_{eq}), \quad (5)$$

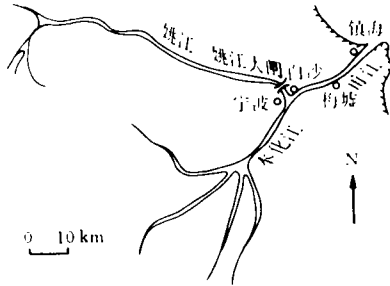


图1 甬江流域图

1) 杭州大学, 国家海洋局第二海洋研究所二、三室. 甬江及整治规划的泄洪计算, 1975.

式中, \bar{C} 为含沙量垂线平均值, C_{eq} 为水流挟沙能力, T_1 为实际底部沙量与垂线平均值之比, T_2 为平衡输沙底部沙量与垂线平均值之比.

1.3 主要泥沙物理参数

Brooks^[12]指出, 当 (W_s/Ku_*) 的值很小时, (其中 K 为卡门常数, u_* 为摩阻流速), 垂线上的平均平衡输沙浓度 (即水流挟沙能力 C_{eq}) 近似等于一半水深处的值. 经推导得底部平衡输沙浓度:

$$C_b^\infty = \left(\frac{z_0}{H+z_0} \right)^{W_s/Ku_*} C_{eq}, \quad (6)$$

式中, z_0 为床面有效糙率高度. 根据甬江的情况, $W_s/Ku_* < 0.12$, 所以 C_b^∞ 可按上式计算, 而 C_{eq} 由下式确定^[13]:

$$C_{eq} = k \left(\frac{U^3}{H} \right)^m, \quad (7)$$

式中, U 为断面平均流速, k 为挟沙能力系数, m 为指数, 其量值由经验确定, H 为平均水深.

在近岸和河口区, 水平扩散系数 D_h 的范围一般为 $10^{-2} \sim 10^2 \text{m}^2/\text{s}$ ^[14], 通过量纲分析知, 水平扩散效应与垂向扩散效应相比是小量, 为计算方便起见, 一般可以看作常数, 本文中取 $D_h = 10 \text{m}^2/\text{s}$. 垂向扩散系数由下式确定^[8]:

$$D_v = \beta K u_* y \left(1 - \frac{y}{H} \right) (1 + a Ri)^b, \quad (8)$$

式中, $\beta \geq 1$, 为悬移质传递系数与紊动动量传递系数之比, Ri 为 Richardson 数, a 、 b 为常数.

1.4 断面泥沙输运的分解

为分析泥沙搬运的动力机理, 须对模式计算所获得的断面泥沙搬运量进行分解. 对一维的情况, 采用 Uncles^[15]的方法, 即:

$$G = \int_0^T Q \bar{C} dt = G_L + G_{tp}, \quad (9)$$

式中, G 为断面输沙量, Q 为断面流量, T 为潮周期, $G_L = Q_L \langle \bar{C} \rangle$ 为拉格朗日 (Lagrangian) 余流搬运项, $G_{tp} = \int_0^T \bar{Q} \bar{C} dt$ 为潮流抽吸作用搬运项 (tidal pumping), Q_L 为拉格朗日余流水量输运. 符号 “ $\langle \rangle$ ” 表示潮周期平均, 上标 “ $-$ ” 表示垂线平均, 上标 “ \sim ” 表示潮切变.

对垂向二维断面泥沙搬运计算, 分解时采用王康培和苏纪兰^[16]的方法, 即:

$$\begin{aligned} G &= \int_0^T H \int_0^1 BUC d\sigma dt \\ &= G_L + G_{tp} + G_{cp} + G_{ic}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中, G_L 和 G_{tp} 的定义同上, $G_{cp} = \int_0^T F \overline{C_v u_v} dt$ 为垂向环流搬运项, G_{ic} 为环流和振荡切变的综合项, σ 为垂向无量纲坐标, F 为过水断面面积, C_v 、 u_v 为含沙量与流速的垂向切变.

2 数值方程

2.1 基本方程的差分离散

对纵向一维水动力方程的数值解, 我们采用 Muir^[17]提出的分汊潮汐河口一维数值方法. 该方法采用 Preissman 差分格式, 而对于一维泥沙及盐度扩散方程, 我们则采用 Eulerian-Lagrangian (E-L) 方法^[18]. 该方法人工数字耗散小, 当跟踪点的物理量采用二次插值时, 格式具有二阶精度.

垂向二维方程求解时, 为计算方便采用 sigma 坐标变换, 使计算域为矩形. 对水动力方程的差分采用 Sheng^[14]描述的纵垂向耦合方法. 垂向二维盐度扩散方程的差分方法与一维的情况基本相同, 采用 E-L 格式. 为取较长的时间步长, 其垂向扩散项用隐式差分格式. 对垂向二维泥沙扩散方程的差分解, 为有效地解决表底层泥沙平衡边界条件, 参考 Celik & Rodi^[19]的做法, 我们采用分裂混合格式, 其水平方向采用显格式, 而垂向用隐格式.

2.2 水位、流量、盐度和泥沙要素在三汊点的连接

本模式有河道分汊问题 (即宁波三江口), 在进行模式计算时首先要解决此分汊点水位、流量、盐度和泥沙要素的计算.

分汊点水位、流量的计算, 可根据水流总是垂直过水断面的原则, 分离出一个汇合区^[17], 如图2所示的阴影部分. 由于这个汇合区面积不大, 可以认为这个区域中各点水位 ζ 相等, 即:

$$\zeta_A = \zeta_B = \zeta_C, \quad (11)$$

其次要求汇合区的流量必须守恒, 即:

$$Q_A + Q_B - Q_C = \frac{S_F \Delta \zeta}{\Delta t}, \quad (12)$$

式中, $\Delta \zeta$ 为 Δt 时段内水位差, Δt 为时间步长, S_F 为三江口起流量调节作用的水面面积, 下标 "A"、"B"、"C" 分别表示断面 A、B、C.

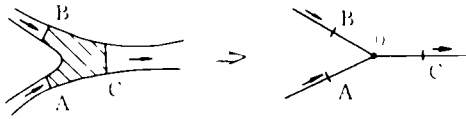


图2 三汊口网络图

以下讨论在垂向二维模式中, 三汊点盐度和泥沙要素的分步计算方法 (一维的计算只是二维的特例). 如图2阴影部分所示, 已知 $n\Delta t$ 时刻进出口物质浓度 q_A 、 q_B 、 q_C 和流速 u_A 、 u_B 、 u_C (σ 、 t 的函数), 求公共点 I_0 在 $(n+1)\Delta t$ 时刻的物质浓度 q_0 . 为此在某一水层先考虑水平平流效应, 有:

$$\begin{aligned} \left(\frac{A_0 H_0}{\Delta t} \right)^{n+1} q_0^n - (A_0 H_0)^n q_0^n &= (u_A F_A q_A)^n + (u_B F_B q_B)^n \\ &\quad - (u_C F_C q_C)^n. \end{aligned} \quad (13)$$

接下来考虑垂向对流及扩散效应, 有:

$$\frac{q_0^{n+1} - q_0^*}{\Delta t} - \frac{1}{H_0^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial \sigma} (D_{v0} \frac{\partial q_0}{\partial \sigma}) \right\}^{n+1} + \left\{ \frac{\partial w_0 q_0}{\partial \sigma} \right\}^{n+1} = 0, \quad (14)$$

式中, U 为水平流速, w 为 σ 坐标垂向流速, 下标“0”表示公共点0, 上标“ $n+1$ ”表示 $(n+1)\Delta t$ 时刻, 上标“ n ”表示 $n\Delta t$ 时刻.

3 模式计算

3.1 资料选择和处理

甬江的地形资料选用1956年的实测航道图. 奉、姚两江无实际地形资料, 计算时设两支流本身不再有分汊, 并假定都是等宽的矩形河道, 河宽和底高程要求满足建闸前进潮量和泥沙冲淤平衡的条件, 其值经调试计算给定.

下游控制断面镇海站的潮位调和常数分别由建闸前1957、1958年和建闸后1959年的逐时潮位经调和与分析得到^[20]. 上游径流资料选用天津水运科学研究所²⁾给出的奉、姚两江建闸前后径流多年统计值, 计算时分别取洪、枯季的平均.

甬江口外来沙的特点是其含量与口内水流条件基本无关, 而是受制于口外沿岸流含沙量情况、风力条件和潮流强弱, 因此可以认为建闸前后口外来沙条件不变. 由于无法收集到口外来流含沙量的连续性资料, 只好简单地取其为常数. 此外, 口外来流含沙量具有明显的洪、枯季差异, 枯季时的值远大于洪季. 本文分别给定镇海断面涨潮流含沙量的洪、枯季平均值.

3.2 泥沙参数的取值

在模式计算中, 我们依据前人有关甬江泥沙的研究成果以及某些文献所提供的泥沙参数值或经验公式确定泥沙参数, 详见表1.

表1 泥沙参数取值

泥沙参数	量 值	备注	泥沙参数	量 值	备注
W_s	0.000 45 m/s	[9]	z_0	0.000 1 m	[14]
ρ_F	800 kg/m ³	[9]	T_1	$2.62 + 0.38 \ln(W_s / Ku_s)$	[11]
K	8.55	2)	T_2	$\{ z_0 / (H + z_0) \}^{W_s / Ku_s}$	[12]
m	0.70	2)	β	1	
k	0.40		a	3.33	[8]
α	1/2	[6]	b	-2.5	[8]

3.3 计算方案

模式进行了多种方案的试验, 以了解径流、口外来沙、口门潮汐变化对甬江水文和泥沙的相应关系和规律. 计算中分别考虑了半日潮 (M_2)、日不等潮 ($m_1 + M_2$) 和半月周期大小潮 ($M_2 + S_2$) 三种情况, 其中 m_1 是 K_1 和 O_1 分潮的和, 称作全日潮^[21]. 另外, 上游径流和口门来沙均考虑洪、枯季的差别 (如上所述).

2) 天津水运工程科学研究所. 甬江口门河段建港后淤积问题的讨论及计算, 1974.

4 模式试验结果和讨论

4.1 泥沙垂向效应

模式试验结果表明,除洪季落潮流的个别时段外,甬江河道(包括上游支流)的泥沙含量总是从下游往上游递减,所以甬江一般不存在由于潮流不对称而引起的最大浑浊带。但在洪季落潮流时,甬江存在一定的盐度层化效应,如图3a,由此产生如图4所示的重力环流。由于此环流的作用,在落潮憩流附近时刻,有一比较弱的浑浊带存在于盐水楔上顶端(约在盐度1.0处),然而若不考虑盐度效应,则洪季落潮流时的含沙量仍为由下游往上游递减,如图3b。可见,在洪季落潮流的个别时段,由于重力环流的作用,甬江有一很弱的浑浊带存在。

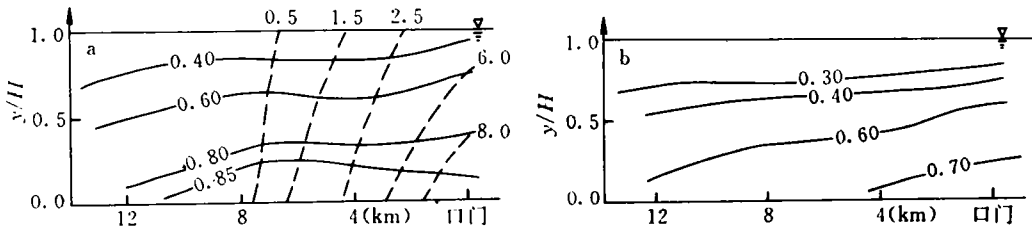


图3 建闸前洪季落潮憩流时,甬江含沙量等值线

a. 考虑盐度的情况; b. 不考虑盐度的情况. 图中实线为沙量等值线
(单位为 kg/m^3), 虚线为盐度等值线. 计算条件: 口门潮汐 M_2 , 上游径流
为奉化江 $110 \text{ m}^3/\text{s}$, 姚江 $97 \text{ m}^3/\text{s}$

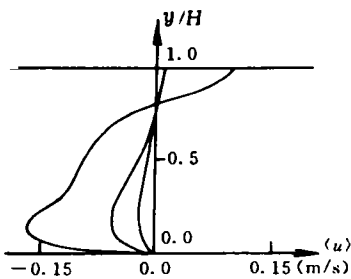


图4 建闸前洪季落潮憩流时,重力环流垂向分布,其中正值为下泄流,负值为上溯流. 计算条件同图3

曲线1(左)、2(中)、3(右)分别为口门、离口门4及8km三个断面的环流

而径流加大了落潮流的冲刷能力。其次,由图5知,径流还体现在它的顶浑效应,即径流大时,口外浑水上溯的距离短;径流小时,浑水的上溯距离远。

建闸后,甬江的径流总量减少不大,约占年径流的5%左右,所以由此所引起的河床冲淤的变化也不大。径流年分配的变化使河床冲淤也发生相应的时间上的改变,但其对冲淤的总

如上所述,甬江只有在洪季落潮流时,盐度有明显的层化。此时泥沙的垂向梯度增大,底层悬沙含量抬高,有利于泥沙在床面淤积。在无明显层化时,甬江泥沙的垂向结构一般比较均匀。此外,计算结果还表明,由于重力环流效应,产生泥沙沿涨潮流向的净搬运,其量值约为每潮700t左右。但此量值比下泄径流所引起的泥沙净搬运量要小一个量级,因此总的环流断面泥沙搬运仍为下泄性质。

4.2 上游径流对泥沙冲淤的影响

计算结果表明,径流的作用主要体现在以下两个方面:首先,径流使落潮流加大,如镇海断面建闸前最大落潮流与最大涨潮流的比值为1.25,而枯季为1.12,因

量不产生明显的影响。

4.3 口外来流含沙量对泥沙冲淤的影响

由于甬江口外洪、枯季节风力条件的差别很大,使得口外来流含沙量枯季远大于洪季. 所以要分析甬江的泥沙冲淤规律,考虑口外来流含沙量洪、枯季的差异是极为重要的因素。

由图6可以看出,当口外来流含沙量大时,不但涨潮流含沙量抬高,且涨潮流含沙量到达峰值时间延后半小时左右. 这是由于平流效应,使口外来流浑水沿河上溯的结果. 由此造成涨潮流含沙量与水力条件不相适应,河床呈现淤积. 当来流含沙量小时,情况正好相反,涨潮流从口外带进的是较清的水,涨潮流含沙量降低,从而减少了涨潮时对床沙的促淤作用,而落潮流从河床掀起泥沙并输向口外,河床呈现冲刷。

建闸后,甬江口内水文发生了变化,而口外来流含沙量条件却未变,这必将对河床冲淤发生显著影响,详情在下节讨论。

4.4 潮汐因素对泥沙冲淤的影响

甬江潮汐为不规则半日潮,具有明显的日不等现象和半月周期大小潮变化. 潮日不等现象对泥沙冲淤的影响主要体现在拉格朗日余流对泥沙的输运作用. 在一个日不等潮周期内,口内河段经历着贮存水和释放水的过程,使得高高潮时的拉格朗日余流为上溯优势流,低高潮时为下泄优势流. 计算结果表明,甬江建闸前其水量输运值约 $160\text{m}^3/\text{s}$,由此产生向口内净泥沙搬运,其量值约为每潮 $200\sim 700\text{t}$. 建闸后日不等现象有所变缓,这样向口内的净泥沙搬运也相应减少. 此外,建闸前后都一样,日不等机制引起的泥沙净搬运比由潮流抽吸作用产生的泥沙净搬运量要小一个量级。

大小潮对泥沙冲淤的影响,建闸前后都表现出相同的特性. 首先,大潮时潮流掀沙能力强,泥沙不易淤积,小潮时则相反;其次,大小潮的变化使落淤量与掀沙量之比产生改变,当潮差减小期间,河床淤积增大,潮差增大时河床淤积减小,如图7所示。

潮波的模拟结果表明,甬江的潮波形态,建闸前后未发生质的变化,原来为接近驻波,建

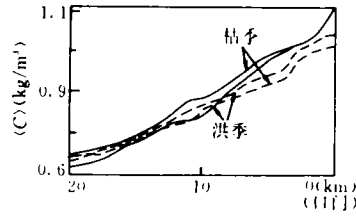


图5 建闸前洪、枯季甬江涨落潮平均含沙量沿程分布

实线为涨潮平均含沙量,虚线为落潮平均含沙量. 计算条件为:口门潮汐 M_2 ,口外来沙为年平均值,取 $1.13\text{kg}/\text{m}^3$,径流分别取洪、枯季平均值

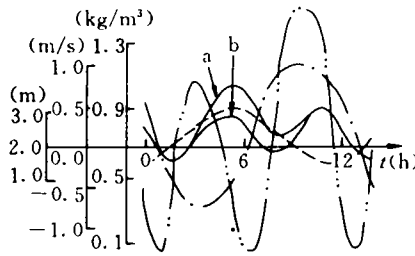


图6 建闸前梅墟站(离口门11km)潮位、流速、含沙量过程线

计算条件为:口门潮汐 M_2 ,上游径流为奉化江 $42.5\text{m}^3/\text{s}$ 、姚江 $37.5\text{m}^3/\text{s}$,口外来沙 a: $1.408\text{kg}/\text{m}^3$, b: $0.856\text{kg}/\text{m}^3$.
---潮位 (m), -·-断面平均流速 (m/s), 正值为落潮流, ——含沙量 (kg/m^3),
-·-水流挟沙能力 (kg/m^3)

闸后变为更接近驻波性质, 涨落潮急流提前20min左右, 但建闸后涨潮沙峰反而有所延后(见图6和8). 同时建闸后潮流速度减小. 这说明, 涨急以后的含沙量继续升高, 主要是因为平流效应从口外带入浑水的结果, 而潮流对床面掀沙的影响相对较小. 由此可见, 建闸引起的潮波变形对床沙冲淤不产生明显影响.

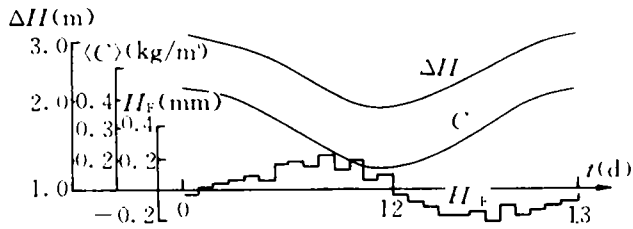


图7 口门潮差 (ΔH) 和奉化江距三汉点32km处潮周期平均含沙量

(\bar{C}) 及每潮冲淤厚度 (H_F) 的半月潮周期变化

计算条件: 口门潮沙 M_2+S_2 , 上游径流为奉化江 $10\text{m}^3/\text{s}$,

姚江 $8\text{m}^3/\text{s}$, 口外来流含沙量 $1.408\text{kg}/\text{m}^3$.

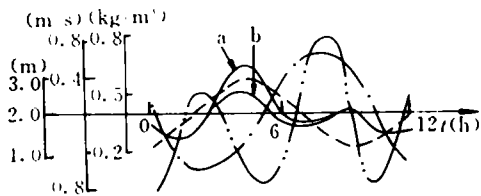


图8 建闸后梅墟站潮位、流速、含沙量过程线

计算条件和图中符号含义同图6

由图6和8可知, 涨潮流的含沙量多大于水流的挟沙能力 C_{eq} 值, 处于过饱和和淤积状态, 造成泥沙在河床落淤; 落潮流的含沙量多小于水流的挟沙能力, 处于次饱和冲刷状态, 因此, 河床泥沙受到冲刷. 建闸前这两种过程基本平衡, 总的来说河床处于平衡状态. 建闸后, 由于姚江支源的进潮量被截, 甬江的进潮量

约减少 $8 \times 10^6 \text{m}^3$ (计算值). 进潮量的这种急剧变化引起潮流减弱, 其冲刷能力也急剧下降. 在口外来沙条件不变的情况下, 涨潮流阶段水流泥沙含量与水力条件不相适应, 涨潮流的含沙量基本上都远大于水流的挟沙能力值 (图8), 所以有大量的泥沙落淤. 落潮流的含沙量虽仍小于水流挟沙能力, 但由于冲刷能力减弱, 落潮含沙量抬高不多, 落潮沙峰远小于涨潮沙峰 (图8). 因为涨潮流含沙量比落潮流含沙量大得多, 在进出潮量基本相同的情况下, 产生沿涨潮流向净泥沙搬运. 以镇海断面为例, 在上游径流和口外来沙均取年平均值的情况下, 沿涨潮流向的泥沙净搬运量每潮可达 10^4t 左右. 虽然以上为建闸后过水断面未经调整的模拟结果, 但这个机理仍可认为是引起建闸后甬江大量淤积的主要原因.

5 结论

(1) 模式成功地处理了三汉点水力、盐度、泥沙要素的计算. 应用纵向一维模式模拟甬江泥沙的冲淤特性获得了较满意的结果; 同时垂向二维模式反映了泥沙垂向效应对甬江冲淤的影响程度.

(2) 模式试验结果表明, 甬江建闸前遵循洪冲、枯淤的规律, 总的冲淤基本平衡. 建闸

后甬江的进潮量急剧减少,而口外来沙条件却未变,使涨潮流阶段泥沙处于过饱和淤积状态时刻较建闸前长,而落潮流阶段冲刷能力相对减弱,这是建闸后甬江出现大量淤积的主要原因。

(3) 建闸初,径流变化以及潮波变形对甬江泥沙冲淤不产生明显的影响。

由于计算经费和资料有限,本模式的计算存在一定的局限性,如模拟的时间尺度太短,口外来流含沙量的给定也与实际情况有一定的距离。此外有关模式中泥沙沉降模式的形式以及平衡输沙时底沙含量 C_{∞}^{∞} 的计算方法都有待进一步研究,但上述结论应仍是可信的。

参考文献

- 1 黄胜,葛志瑾. 潮汐河口类型商榷. 南京水利所研究报告汇编(1958~1962),河港研究第二分册,1963.
- 2 罗肇森,顾佩玉. 建闸河口淤积变化规律和减淤措施. 第一次河流泥沙国际学术讨论会论文集, Vol. 1, 1980
- 3 袁美琦. 甬江河段淤积问题的分析. 水道港口, 1982, 10(2):11~13
- 4 Edinger J E and E M Buchak. Numerical hydrodynamics of estuaries. In: Estuarine and Wetland Processes, 1980, 115~146.
- 5 Vongvisessomjai S and P Pongpirodom. A laterally averaged model for estuarine sedimentation. In: Proc. Third International Symposium on River Sedimentation, 1986, 453~462
- 6 林秉南,黄菊卿,李新春. 钱塘江河口潮流输沙数学模型. 泥沙研究, 1981, (2): 16~27.
- 7 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学,北京:科学出版社,1983
- 8 O'Connor B A and S Zein. Numerical modeling of suspended sediment. In: Proc. the 14th Conference on Coastal Engineering, Vol. 2, 1974, 1109~1120
- 9 罗肇森. 河口航道开挖后的回淤计算. 泥沙研究, 1987, (2):13~20
- 10 O'Connor B A and J Nicholson. A three-dimensional model of suspended particulate sediment transport. Coastal Engineering, 1988, 12, 157~174
- 11 韩曾萃,程杭平. 钱塘江河口河床变形计算方法. 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集, 1983, 108~117
- 12 Brooks. In: Sedimentation engineering. ASCE Manual, 1975, 172~173
- 13 武汉水利电力学院. 河口动力学,北京:中国工业出版社,1961, 60~63
- 14 Sheng Y P. Mathematical Modeling of Three-dimensional Coastal Currents and Sediment Dispersion, 1983
- 15 Uncles R J *et al.* Observed fluxes of water, salt and suspended sediment in a partly mixed estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 20, 1985, 147~167
- 16 王康培,苏纪兰. 长江口南港环流及悬移质输运的计算分析. 海洋学报, 1987, 9, 627~637
- 17 Muir L R. A one-dimensional tidal model for estuarine networks. In: Hydrodynamics of Estuaries and Fjords, 1978
- 18 Cheng R T, V Casulli and S N Milford. Eulerian-Lagrangian solution of the convection dispersion equation in natural coordinates. Water Resources Research, 1984, 20(7):944~952
- 19 Celik I and W Rodi. Modeling suspended sediment transport in nonequilibrium situation. J. Hydraulic Engineering, 1988, 114(10):1157~1191
- 20 陈耕心,李伯根,许卫忆. 乐清湾潮汐特征及对潮滩沉积作用的影响. 东海海洋, 1992, 10(1):1~9
- 21 方国洪,杨景飞. 东海东部和南部潮流的数值计算. 海洋学报, 1987, 9(4):403~412