

# 银洲湖水域强潮河段悬移质输运模型

罗 锋<sup>1</sup>,李瑞杰<sup>1,2</sup>,朱文谨<sup>2</sup>

(1.河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室,江苏 南京 210098;2.河海大学物理海洋研究所,江苏 南京 210098)

**摘要** 利用平面二维水动力及泥沙输运模型、有限元法对银洲湖及邻近水域内的悬沙输运、流速分布、水流平面形态等进行了数值模拟计算.其中黏性泥沙输运模型考虑侵蚀和沉积剪切应力.计算结果与实测结果比较表明,银洲湖水域的潮流大体上呈现沿航道南北向的往复流,径流和潮流是银洲湖水域的主要动力因素,细颗粒悬浮泥沙输运是该水域泥沙的主要运动形式.平面二维水动力及泥沙输运模型能较好地复演银洲湖水域的潮流泥沙场,可用于实际工程潮流泥沙场的计算.

**关键词** 银洲湖水域 强潮河段 泥沙输运 数值模拟 有限元法

**中图分类号** TV148 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2008)01-0129-05

崖门位于新会县崖南镇,是潭江的入海口门,它与虎跳门均位于黄茅海湾的头部.崖门也是珠江8大口门中最西边的一个口门,潭江水域的径流主要通过银洲湖从崖门出海.银洲湖水域位于珠江三角洲的西南部,是西江和潭江汇流于新会境内的一条黄金水道,湖面南北走向,北至黄克竞大桥和黄宣充大桥,由劳龙虎水道连接西江,南与珠江8大出海口最西边的崖门水道相连,南北长约35 km,宽1.5~2 km,水域面积约65 km<sup>2</sup>,岸线总长约80 km.银洲湖水域河流来沙量少,具有强大的潮汐动力,主航道常年保持7~13 m水深,径流和潮流是使其得以维持的主要动力因素,悬沙是该水域泥沙的主要运动形式,银洲湖建港后的泥沙回淤不大.银洲湖水域为径流与潮流相互作用的潮汐水道,弱径流,强潮流,口外的黄茅海属不规则半日潮型,平均高潮位0.53 m,平均低潮位-0.69 m,平均潮差1.24 m.

虽然河流来沙量少,但随着珠江三角洲经济的发展,银洲湖水域逐渐成为临港加工业、物流业和江海联运及货物集散枢纽中心,发展就必然带来环境影响问题.同世界其他水域一样,上游来沙吸附了流域排放的大量污染物,随之由崖门汇入黄茅海或是沉积到底床,因此河口泥沙对水质的负面影响已经成为一个值得关注的问题.即使对已有的污染源进行治理控制,但已经由泥沙吸附的污染物沉积而成的底床泥沙也会在今后的几年甚至更长时间内成为主要的污染源.研究银洲湖水域对河口环境的影响,首先必须对整个水域的水动力特性及悬移质输运问题进行研究.文献[1-4]已对崖门出海航道及太平水道等水域进行了模拟研究.本文则通过数值模拟手段对其上游银洲湖水域水沙特性进行探讨.

## 1 输运模型

在悬沙输运研究中,考虑空间二维或三维、时间相关模型是必要的.研究和应用表明,有时候二维水沙模型的模拟结果已基本能满足所描述的悬沙输运过程的精度.但对于一些复杂问题,采用三维模型则更好些.二维模型虽然在水流和泥沙输运模拟上不能反映三维模型的某些特性,但大大减少了计算量,使得泥沙输运的长期(1年甚至几年)数值模拟成为可能.从这种意义上讲,目前二维泥沙输运数值模拟在工程应用中显得尤为重要.本文针对银洲湖水域水深地形和水沙特性,研究银洲湖强潮河段平面二维悬沙输运模型,其中源汇项的处理采用了床面切应力的方法<sup>[5-7]</sup>.本文的研究重点是黏性泥沙的输运,为考虑河床固结的影响,不同时期的泥沙采用不同的冲刷率公式,不同的悬沙浓度和净床面切应力采用不同的沉积率公式.

水动力控制方程为沿垂向积分的平面二维浅水方程

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(ud) + \frac{\partial}{\partial y}(vd) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = & -g \frac{\partial d}{\partial x} - g \frac{\partial z_b}{\partial x} + u\Omega + \frac{1}{\rho d} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_{xx} d \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_{xy} d \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \right. \\ & \left. \zeta W^2 \cos \psi - \frac{gu}{C^2 d} (u^2 + v^2)^{1/2} \right] \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = & -g \frac{\partial d}{\partial y} - g \frac{\partial z_b}{\partial y} - u\Omega + \frac{1}{\rho d} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_{yx} d \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_{yy} d \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \right. \\ & \left. \zeta W^2 \sin \psi - \frac{gv}{C^2 d} (u^2 + v^2)^{1/2} \right] \end{aligned} \tag{3}$$

式中： $d$ ——总水深； $z_b$ ——床面高程； $t$ ——时间； $u, v$ ——垂线平均流速在  $x, y$  方向上的分量； $g$ ——重力加速度； $\rho$ ——水密度； $\zeta$ ——风应力经验系数； $W$ ——风速； $\psi$ ——风向； $\epsilon_{ij}$ —— $j$  平面  $i$  方向的涡动扩散系数； $C$ ——Chezy 系数； $\Omega$ ——柯氏力参数， $\Omega = 2\omega \sin \varphi$  ( $\omega$  为地球自转角速度； $\varphi$  为当地纬度)。

从床面侵蚀的黏性泥沙输运存在 3 个过程：(a) 对流扩散——假设泥沙以水流平均速度输运；(b) 湍流扩散——因为空间上泥沙浓度梯度的存在，泥沙在空间 3 个方向上扩散输运；(c) 纵向扩散——因为存在空间速度梯度，悬沙在水流方向上扩散输运。

垂向积分的平面二维悬沙对流扩散方程由下式给出，式中包含源汇项<sup>[8]</sup>：

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial C}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial C}{\partial y} \right] + S_T \tag{4}$$

式中： $C$ ——悬沙含量； $D_{ij}$ —— $j$  平面  $i$  方向的有效泥沙扩散张量； $S_T$ ——源汇项。

扩散系数采用 Fischer<sup>[9]</sup> 的研究成果：

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \frac{0.2u^2 d^2}{0.067u_f d} \times 0.10 = 0.30 \frac{u^2 d}{u_f} D_{xy} = \frac{0.2u v d^2}{0.067u_f d} \times 0.10 = 0.30 \frac{u v d}{u_f} \\ D_{yx} &= \frac{0.2u v d^2}{0.067u_f d} \times 0.10 = 0.30 \frac{u v d}{u_f} D_{yy} = \frac{0.2v^2 d^2}{0.067u_f d} \times 0.10 = 0.30 \frac{v^2 d}{u_f} \end{aligned} \tag{5}$$

式中  $u_f$  为摩阻流速。

式(4)中  $S_T$  表示为

$$S_T = \left. \frac{dC}{dt} \right|_e + \left. \frac{dC}{dt} \right|_d + S_L \tag{6}$$

式中： $\left. \frac{dC}{dt} \right|_e$ ——从床面侵蚀起来的悬沙增加量(源)； $\left. \frac{dC}{dt} \right|_d$ ——泥沙因沉积到床面上而减少的量(汇)； $S_L$ ——挖泥等引起的河床泥沙减少量或因抛泥等引起的泥沙增加量。

不同级配的黏性泥沙的冲刷试验结果表明，与非黏性泥沙不同，黏性泥沙冲刷和淤积不会同时发生<sup>[10-11]</sup>。式(6)中表示冲刷的  $\left. \frac{dC}{dt} \right|_e$  项，通过再悬浮率  $\epsilon$  的选取考虑河床固结的影响。再悬浮率  $\epsilon$  与悬浮物浓度随时间的变化值  $dC/dt$ 、冲刷深度  $z_e$  随时间的变化值有关，它们之间的关系为

$$\epsilon = d \left. \frac{dC}{dt} \right|_e = \rho_s(z_e) \frac{dz_e}{dt} \tag{7}$$

其中  $\rho_s(z_e)$  为深度  $z_e$  处的泥沙干密度。因此，式(6)中的源项  $\left. \frac{dC}{dt} \right|_e$  可表示为

$$\left. \frac{dC}{dt} \right|_e = \frac{\epsilon}{d} \tag{8}$$

新沉积泥沙与已固结在底床的泥沙  $\epsilon$  采用不同的处理方法，即考虑河床固结的影响，对于不同时期的泥沙，冲刷率公式(8)采用不同的形式，本文采用 Mehta 等提出的计算公式<sup>[8]</sup>。

式(6)中表示淤积的  $\left. \frac{dC}{dt} \right|_d$  项，通过泥沙质量守恒方程  $\left. \frac{dC}{dt} \right|_d = -\frac{P_d W_s C}{d}$  给出，其中  $d$  为水深， $W_s$  为泥沙

沉降速度， $P_d$  为沉降概率。Krone 假设  $P_d$  随着床面剪切应力  $\tau_b$  的减小而线性增加， $P_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$ ， $\tau_{cd}$  为沉降剪切应力， $\tau_b > \tau_{cd}$  时不发生沉积。因此，

$$\left.\frac{dC}{dt}\right|_d = -\frac{W_s}{d}\left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right)C$$

(9)

不同的  $C$  和  $\tau_b$ , 沉积率公式(9)形式不同, 本文采用 Hayter 等提出的公式<sup>[8]</sup>.  
河床变形方程为

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

(10)

式中:  $q_x, q_y$  分别为单宽输沙率在  $x, y$  方向的分量, 通过爱因斯坦公式或 Ackers-White 公式确定.  
本文用有限元法对上述方程进行了数值求解, 求解时将 Galerkin 加权残余法直接应用于上述方程, 由于对流加速度项的非线性, 计算中采用牛顿迭代法求解非线性方程.

2 数值模拟

2.1 研究范围、计算网格及边界条件

数值模拟范围及网格剖分如图 1 和图 2 所示(均为北京坐标), 研究水域长约 36 km. 模型选取潭江水道、江门水道、虎坑水道、上沙河、下沙河、虎跳门水道、虎山附近断面作为控制边界, 上下游边界均以水位控制. 有限元网格节点 13 028 个, 网格单元数 5 924 个, 其中四边形网格 534 个, 三角形网格 5 390 个. 四边形网格沿航道布置, 地形资料采用 2005 年 1 月测图.

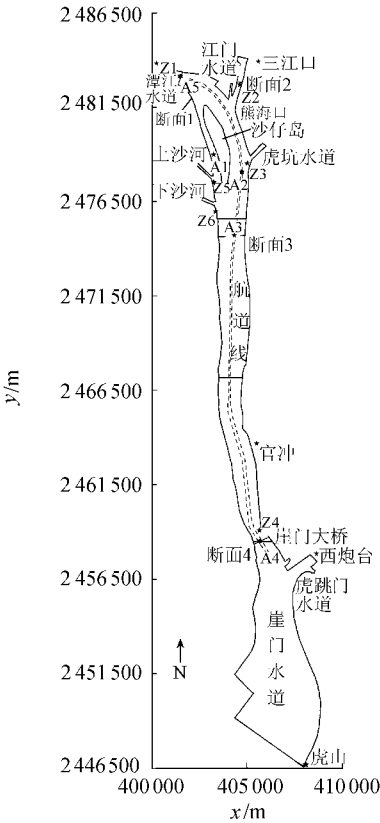


图 1 研究范围及验证水文站点布置  
Fig.1 Verification of hydrological station distribution in research domain

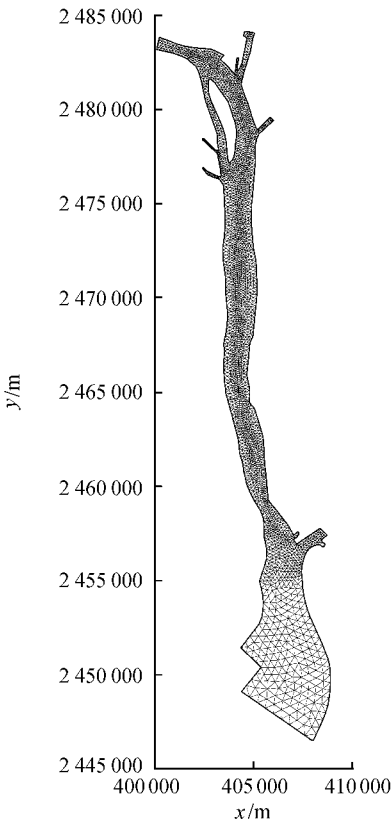


图 2 研究水域计算网格  
Fig.2 Computational mesh of research domain

2.2 潮位验证

水文数据采用 2005 年 4 月前后的实测枯季大潮资料. 潮位验证站点有 6 个, 图 1 断面 2 处 (Z2)、虎坑水道出口 (Z3)、崖门大桥上游约 200 m 处 (Z4)、上沙河出口 (Z5)、下沙河出口 (Z6) 水尺及官冲站. 图 3 仅给出了 Z2, Z4 及官冲水位验证结果, 计算的潮位过程与实测资料相当吻合. 由于崖门水道既受潮汐作用的影响, 又受地形和径流的影响, 进入的潮波发生变形, 涨潮历时缩短, 落潮历时延长, 其潮差变化也呈由熊海口至虎山出口渐增趋势. 其中, Z2 站位涨落潮较 Z4 站位延时约 1 h.

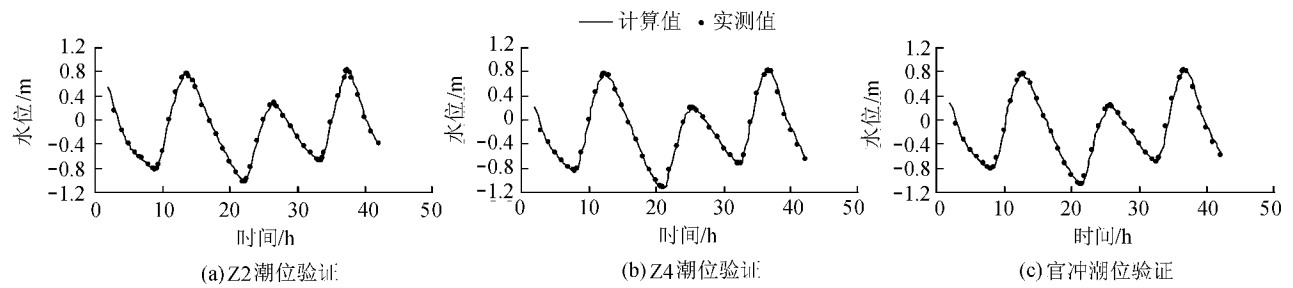


图 3 各站点大潮水位验证结果

Fig.3 Comparison of observed and computed tidal levels at different verification stations

2.3 流速验证及流场特性

流速验证点共有 5 个,图 1 断面 1,3,4 上的 A5,A3,A4 以及沙仔岛两侧的 A1,A2. 流向只在 A3,A4,A5 有实测值,因此图 4 给出其大潮流速流向验证结果. 流速的正负代表潮流的涨落,落潮正值,流向值为与东方向顺时针旋转的夹角(与实测值对应). 从图 4 可见,计算结果与实测结果相当吻合. 银洲湖水域的潮流运动形式大体上呈现沿航道南北向的往复流,断面流速分布与河槽断面形状相近,主泓(深槽)附近流速较大,近岸流速较小. 江心洲沙仔岛附近的流场明显有所不同,到了虎山附近河宽逐渐变大呈喇叭口形式,因此落潮流速有所减小. 总体而言,涨潮流速大于落潮流速,落潮历时长于涨潮历时.

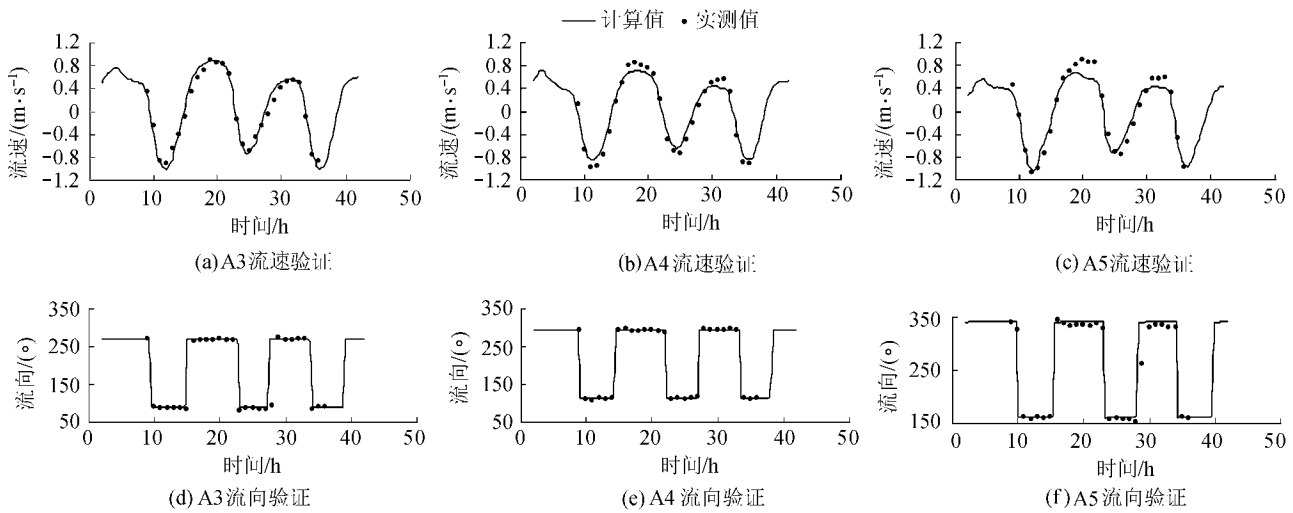


图 4 各站点大潮流速流向验证结果

Fig.4 Comparison of observed and computed flow velocities and directions at different verification stations

2.4 悬沙验证

银洲湖及其上下游流域的推移质输沙量均不大,约占悬沙的 10%. 近年来,上游(推移质绝大部分在上段落淤)河沙被大规模采挖,泥沙绝大部分呈现以悬移质方式输移的细颗粒泥沙. 实测资料显示,银洲湖水域悬移质的粒径均小于 0.1 mm,中值粒径在 0.005 mm 左右,因此模型计算时当作黏性泥沙考虑. 悬沙验证点与流速验证点布置一样. 图 5 给出了 A2~A4 站位大潮悬沙含量的计算结果与实测结果. 从图 5 可以看出,含沙

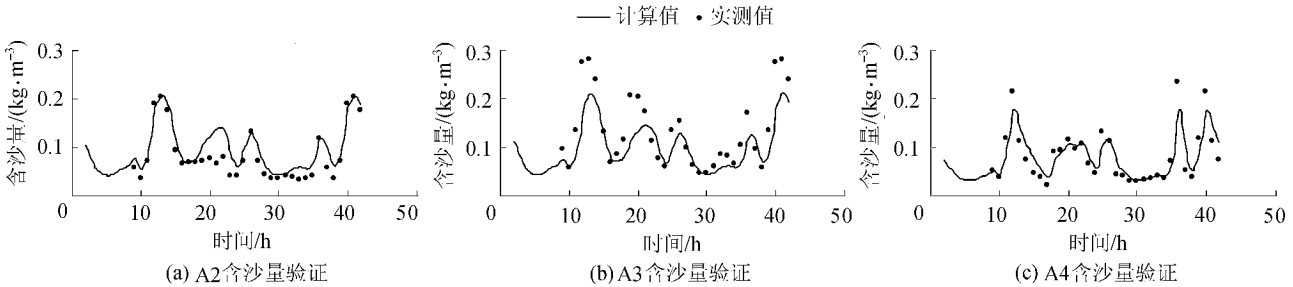


图 5 各站点大潮悬沙含量验证结果

Fig.5 Comparison of observed and computed sediment concentrations at different verification stations

量的变化趋势一致,悬沙含量较低,最大悬沙含量为  $0.25\text{ kg/m}^3$  左右,各测点的含沙量平均值基本上都小于  $0.10\text{ kg/m}^3$ ,计算结果与实测结果吻合很好.

3 结 语

银洲湖悬移质输运模型能够较好地重演银洲湖水域潮流泥沙场,可以用于地形复杂的实际工程的潮流泥沙场模拟.银洲湖水域的潮流大体上呈现沿航道南北向的往复流,其潮差变化也呈由熊海口至虎山渐增趋势,涨潮流速大于落潮流速,落潮历时长于涨潮历时.径流和潮流是银洲湖水域的主要动力因素,细颗粒悬浮泥沙输运是该水域泥沙的主要运动形式.悬沙含量较低,最大约为  $0.25\text{ kg/m}^3$ ,各测点的含沙量平均值基本上都小于  $0.10\text{ kg/m}^3$ .

参考文献：

[1] 李瑞杰,严以新,宋志尧.太平水道悬移质输运数学模型[J].泥沙研究,2003(4):46-51.  
[2] 李瑞杰.崖门 5000 吨级出海航道整治工程工可阶段数学模型研究报告[R].南京:河海大学海岸及海洋工程研究所,2003.  
[3] 李瑞杰,罗锋,朱文谨.崖门水道航道治理工程可行性研究数学模型研究报告[R].南京:河海大学环境海洋实验室,2005.  
[4] 李瑞杰,王昌杰,邵宇阳,等.珠江口崖门出海航道回淤分析[J].中国港湾建设,2005(2):5-7.  
[5] PARTHENIADES E.Erosion and deposition of cohesive soils[J].Journal of the Hydraulic Division,ASCE,1965,91(2):105-138.  
[6] 窦国仁.潮汐水流中悬沙运动及其冲淤计算[J].水利学报,1963(4):13-23.  
[7] 韩其为.非均匀沙不平衡输沙的理论研究[J].水利水电技术,2007(1):14-23.  
[8] HAYTER E J, MEHTA A J. Modeling cohesive sediment transport in estuarial waters[J]. Applied Mathematical Modeling, 1986, 10(8): 294-303.  
[9] FISCHER H B. Longitudinal dispersion in laboratory and natural streams[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1966.  
[10] MEHTA A J, PARTHENIADES E. An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments[J]. Journal of Hydraulics Research, 1975, 13(14): 361-381.  
[11] MEHTA A J, PARTHENIADES E. Kaolinite resuspension properties[J]. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 1979, 105(4): 411-416.

Suspended sediment transport model for strong tidal reach  
in Yinzhouhu waters

LUO Feng<sup>1</sup>, LI Rui-jie<sup>1,2</sup>, ZHU Wen-jin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence of Ministry of Education,  
Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Institute of Physical Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** By use of the 2D plane hydrodynamic and sediment transport finite element model, the suspended sediment field, tidal current field, and plane flow pattern were simulated and calculated. The erosion and deposition-induced shear stresses were considered in cohesive sediment transport model. The comparison of the calculated result with the measured data shows that the reciprocal flow in south and north directions along the navigation channel is the main form of tides in Yinzhouhu waters, runoff and tidal flow are the main dynamic factors of Yinzhouhu waters, and fine-particle suspended sediment transport is the main form of sediment movement. As a result, the 2D plane hydrodynamic and sediment transport model is effective for simulating the tidal and sediment fields, and can be used in practical projects.

**Key words** Yinzhouhu waters ; strong tide reach ; water-sediment transport ; numerical simulation ; finite element method