

文章编号: 1672-3031(2006)04-0246-07

三维水动力泥沙输移模型及其在珠江口的应用

王崇浩¹, 韦永康²

(1 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100044; 2 香港理工大学 土木及结构工程系, 香港, 九龙)

摘要: 为研究河口的泥沙输移规律和最大浑浊带与盐水入侵、咸淡水混合等的关系, 本文提出了具有二阶精度、建立在 9 结点有限单元上的三维水动力及泥沙输移模型, 该模型考虑了由水平密度梯度引起的斜压项、引用 2.5 阶 Mellor-Yamada 紊流模型耦合计算水流的涡动黏滞性系数与物质的紊动扩散系数。本模型采用破开算子法求解控制方程: 用欧拉-拉格朗日法求解水平对流项; 用有限元法求解水平扩散项; 有限差分法求解垂向扩散项。模型应用于模拟珠江口的泥沙运动, 计算域包括整个河口的八大口门, 用 1998 年 7 月的洪季大潮实测资料进行了潮位、流速及流向、盐度及含沙量等的验证, 模型计算结果与实测结果吻合良好。在模型验证的基础上, 文中简要讨论了珠江河口的泥沙输移、盐水入侵及最大浑浊带等物理现象。

关键词: 三维模型; 泥沙输移; 珠江口; 盐水入侵; 最大浑浊带

中图分类号: TV148

文献标识码: A

黏性泥沙的输移对海洋环境的变化和河口海岸工程建设的许多方面有至关重要的影响。河口环境的动力因素非常复杂, 受径流、潮流、波浪、风及柯氏力等的影响, 甚至要考虑风暴潮、河口细颗粒黏性泥沙的沉积与悬浮过程、絮凝与絮凝体的破坏过程、床面泥沙的固结等。长期以来, 对河口泥沙问题的研究和了解尚不全面。近年来, 在数学模型研发和应用方面有了长足的发展, 用于研究河口海岸的泥沙问题。O Conner 和 Nicholson^[1]开发了流体-黏土输移模型, 考虑了黏土的絮凝和固结; Katopodi 和 Ribberink^[2]发展了准三维悬沙模型, 模型对波浪、潮流的对流扩散方程利用逼近技术求解; Briand 和 Kamphuis^[3]考虑准三维流速场与当地悬沙的垂直分布关系, 发展了泥沙输移计算的一种新方法; Cancino 和 Neves^[4]开发了水动力和细颗粒黏性泥沙输移的三维有限差分斜压模型; Wu 和 Falconer^[5]开发了计算河口盐度和黏性沙输移的分层三维模型。

珠江河口, 也称伶仃洋, 位于珠江三角洲东部, 通向南中国海, 河口呈喇叭型漏斗状, 西北北-东南南走向, 区内分布着香港、澳门、广州、深圳等经济发达的中国城市(图 1)。随着中国经济的发展, 珠江河口得以大范围的开发利用, 水利、航运等工程大量展开, 需要进行珠江口的水动力及泥沙运动方面的深入研究。田向平^[6]和 Wai 等^[7]讨论了珠江口的最大浑浊带, Wang 等^[8]用平面二维模型计算研究了珠江口的泥沙运动特性。为更深入地研究水流结构与泥沙运动, Chen 等^[9]开发了三维模型。然而, 这些模型还存在一定的不足, 如没有考虑盐度和斜压项对水流的影响, 而这些因素在河口的水流运动和输沙中又起着十分重要的作用。若要研究河口的最大浑浊带问题, 一个高精度的紊流模型耦合计算涡黏系数是十分必要的。本文针对河口地形复杂、动力因素多的特点, 在前人研究的基础上, 提出了基于有限单元网格的三维水动力泥沙模型, 该模型耦合了紊流模型, 并考虑了水平密度梯度引起的斜压作用等。

1 数学模型

1.1 控制方程 模型采用静水压力假定条件下的雷诺平均 Navier-Stokes 水流运动方程, 考虑到河口中

收稿日期: 2006-01-01

作者简介: 王崇浩(1968-), 浙江奉化人, 高级工程师, 主要从事水动力及泥沙运动数学模型计算研究。

E-mail: chwang@iwhr.com

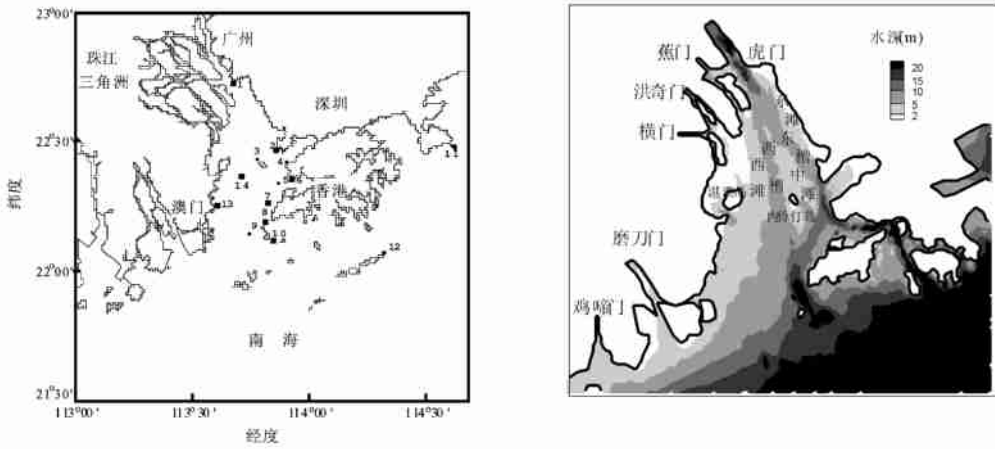


图1 珠江口地形与测站布设

水平密度梯度对水流动量的作用,模型考虑了斜压项。

水流连续方程

$$\frac{u}{x} + \frac{v}{y} + \frac{w}{z} = 0 \quad (1)$$

水流动量方程

$$\frac{u}{t} + u \frac{u}{x} + v \frac{u}{y} + w \frac{u}{z} = -g \frac{\rho}{\rho_0} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\rho}{x} \left(z \frac{dz}{dz} \right) + \frac{1}{x} \left(h \frac{u}{x} \right) + \frac{1}{y} \left(h \frac{u}{y} \right) + \frac{1}{z} \left(z \frac{u}{z} \right) + fv \quad (2)$$

$$\frac{v}{t} + u \frac{v}{x} + v \frac{v}{y} + w \frac{v}{z} = -g \frac{\rho}{\rho_0} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\rho}{y} \left(z \frac{dz}{dz} \right) + \frac{1}{x} \left(h \frac{v}{x} \right) + \frac{1}{y} \left(h \frac{v}{y} \right) + \frac{1}{z} \left(z \frac{v}{z} \right) + fu \quad (3)$$

$$\frac{P}{z} = -g \quad (4)$$

盐度守恒方程

$$\frac{s}{t} + u \frac{s}{x} + v \frac{s}{y} + w \frac{s}{z} = \frac{1}{x} \left(s, h \frac{s}{x} \right) + \frac{1}{y} \left(s, h \frac{s}{y} \right) + \frac{1}{z} \left(s, z \frac{s}{z} \right) \quad (5)$$

泥沙运动方程

$$\frac{c}{t} + u \frac{c}{x} + v \frac{c}{y} + w \frac{c}{z} - \frac{s}{z} = \frac{1}{x} \left(s, h \frac{c}{x} \right) + \frac{1}{y} \left(s, h \frac{c}{y} \right) + \frac{1}{z} \left(s, z \frac{c}{z} \right) \quad (6)$$

式中: t 为时间(s); η 为潮位(m); u 、 v 和 w 分别为直角坐标系中 x 、 y 和 z 方向的流速分量(m/s); z 为纵坐标,以平均海平面为原点,向上为正(m); ρ 、 ρ_0 和 $\Delta\rho$ 分别为海水密度、参考密度及两者之差(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); f 为柯氏力参数; s 为盐度(ppt); c 为悬沙浓度(kg/m^3); s 为泥沙的沉速(m/s); h 和 z 分别为水平和垂向的水流涡动黏性系数(m^2/s); s, h 和 s, z 分别为水平和垂向的紊动扩散系数(m^2/s)。

为精确计算式(5)和式(6)中的涡动黏性系数和紊动扩散系数,引入具有诊断方程的2.5阶 Mellor-Yamada^[10, 11] 紊流模型计算紊动动能和掺混长度。

紊动动能方程

$$\frac{q^2}{t} + u \frac{q^2}{x} + v \frac{q^2}{y} + w \frac{q^2}{z} = \frac{1}{x} \left(q \frac{q^2}{x} \right) + \frac{1}{y} \left(q \frac{q^2}{y} \right) + \frac{1}{z} \left(q \frac{q^2}{z} \right) + 2 \left[P_s + P_b - \frac{q^3}{B_1 l} \right] \quad (7)$$

紊动动能耗散方程

$$\frac{q^2 l}{t} + u \frac{q^2 l}{x} + v \frac{q^2 l}{y} + w \frac{q^2 l}{z} = \frac{1}{x} \left(q \frac{q^2 l}{x} \right) + \frac{1}{y} \left(q \frac{q^2 l}{y} \right) + \frac{1}{z} \left(q \frac{q^2 l}{z} \right) +$$

$$lE_1[P_s + P_b] + lE_1E_3 \frac{g}{0} \left[\frac{-}{z} - \frac{1}{v_s^2} \frac{p}{z} \right] - \frac{q^3}{B_1} \left[1 + E_2 \left(\frac{l}{L} \right)^2 \right] \tag{8}$$

式中: $P_s = z \left(\frac{u}{z} \right)^2 + z \left(\frac{v}{z} \right)^2$ 为剪力动能项; $P_b = \frac{g}{0} s_{s,z} \frac{p}{z}$ 为浮力动能项; $q^3 B_1 l$ 为紊动散耗率; $L = [(-z)^{-1} + (H-z)^{-1}]$; $q = q l S_q$ 为紊动动能的涡动扩散系数; p 为水压力; v_s 为声速; k 为卡门常数。最后一项描述边壁和自由水面对掺混长度的影响。

垂向涡黏系数和扩散系数 $z = q l S_z$ 和 $s_{s,z} = q l S_{s,z}$ 。稳定函数 S_z 和 $S_{s,z}$ 与里查德森数有关,

$$S_z = \frac{A_2(1 - 6A_1 B_1)}{1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H}, S_{s,z} = \frac{A_1(1 - 3C_1 - 6A_1 B_1) + S_z(18A_1^2 + 9A_1 A_2) G_H}{1 - 9A_1 A_2 G_H} \tag{9}$$

式中: $G_H = - \frac{l^2}{q} \frac{g}{0} \left[\frac{-}{z} - \frac{1}{v_s^2} \frac{p}{z} \right]$, 系数 $A_1 = 0.92, A_2 = 0.74, B_1 = 16.6, B_2 = 10.1, C_1 = 0.08, E_1 = 1.8, E_2 = 1.8, E_3 = 0.25 - 1.0, S_q = 0.2^{[12]}$ 。

1.2 边界条件 一般地, 开边界上水流、盐度和悬沙浓度由实测资料确定, 陆地边界的法向流速通常定为零。自由水面和床面的水流边界为切应力和垂向流速, 可表示为

$$z \left(\frac{u}{x}, \frac{v}{x} \right) = \begin{cases} (s_x, s_y) & \text{水面} \\ (b_x, b_y) & \text{床面} \end{cases} \tag{10}$$

$$w = \begin{cases} \frac{-}{t} + u \frac{-}{x} + v \frac{-}{y} & \text{水面} \\ -u \frac{h}{x} - v \frac{h}{y} & \text{床面} \end{cases} \tag{11}$$

水面和床面盐度通量为零, 而动能和掺混长度的边界条件为

$$q^2 = B_1^3 u^{*2}, q^2 l = 0 \tag{12}$$

水面的泥沙通量也为零, 床面上的泥沙能量表示水体与床面的泥沙交换量, 表达为

$$q_s = s c + s_{s,z} \frac{c}{z} \tag{13}$$

1.3 数值方法 垂向上利用 坐标转换。模型采用破开算子法离散对流扩散方程^[9, 13, 14], 将复杂的物理过程分解为相对简单的三步求解。第一步, 用欧拉- 拉格朗日法求解动量方程的对流项和柯氏力项、标量的对流项; 第二步, 用有限元法求解各层水平扩散项; 第三步, 用有限差分法求解水流动量方程的垂向对流项和压力项, 标量方程的垂向扩散项及源汇项。

2 模型在珠江口的应用

2.1 实测资料说明 1998 年洪季, 香港土木工程署在珠江口进行了水文和水质测验, 测站布设如图 1 所示。测验内容包括 6 月 20 日~ 7 月 20 日的 30d 连续潮位; 7 月 1~ 16 日的 15d 连续潮流及水深, 时间间隔为 1h; 小潮(7 月 4~ 5 日)和大潮(7 月 9~ 10 日)的 28h 船测垂线流速及水质取样。

水质测验包括悬移质含沙量、水温、盐度、重金属等, 时间间隔 3.0~ 3.5h, 每条测验垂线自海底至水面等间距布设 5 点, 每个取样点每测次取样 8 次。

2.2 模型范围及参数 为模拟珠江口的潮流、盐度和泥沙运动, 模型计算水域覆盖珠江口八大口门, 向南至 70m 等深线附近, 计算域面积 3.82 万 km², 其中水域面积 1.85 万 km²。计算域被分成 1404 个 9 结点有限单元, 共有结点数 6036 个, 单元面积从 0.3~ 63.0 km², 最小单元在香港水道, 伶仃洋的计算单元一般在 1~ 2 km²。

珠江口八大口门入海边界为洪季平均流量, 外边界为 M2、S2、O1 和 K14 个分潮的合成潮波。相应地, 口门处的泥沙浓度为多年平均洪季含沙量, 外海边界的盐度设为 33ppt。

模拟时期为 1998 年 7 月 1 日 0:00~ 7 月 11 日 0:00, 包含一个大潮和一个小潮。模型预运行 5d 后的结果作为初值, 时间步长为 180s。

2 3 模型的验证 用实测资料验证了潮位、潮流(流速及流向)、流态、盐度和悬沙浓度。图 2 比较了测站 1、3、12、13 的潮位计算值与实测值, 计算潮位的平均误差在 0.15m 以内, 口门附近的误差稍大。考虑到外边界只有 4 个分潮合成, 且入海河流边界的多年平均流量与实际过程可能会有一定出入, 可以认为模型的计算结果与实测值符合良好。

珠江口的潮流不但受外海潮波的影响, 还与地形条件及珠江入海水流的强度密切相关, 由此造成珠江口涨落潮流的不对称。通常地, 落潮流速大于涨潮流速, 落潮持续时间长于涨潮时间^[11]。图 3 比较了测站 6 和 8 的流速及流向的计算值与实测值, 两站分别位于珠江口的东槽和西槽的下段。由图可见, 模型能较好地模拟潮流过程, 各站的计算流速和流向与实测值吻合良好。测站 6 和 8 离口门较远, 涨落潮流的时间比较对称, 主流沿自主槽方向作往复运动, 模型也很好地反映了这些水流特性。

图 4 为测站 6 和 8 的洪季大潮底层、中层和表层的盐度过程的计算值与实测值比较图。由图可见, 模型计算的各层盐度与实测值基本吻合, 说明本模型能较好地模拟守恒物质的对流与扩散, 也意味着边界上的盐度设定值与实际情况基本一致。

图 5 为测站 6 和 8 的洪季大潮期间的垂线悬沙浓度变化过程的计算值与实测值比较图。基本上, 模型的计算值与实测过程一致, 在数量上也接近。模型反映了珠江河口的泥沙涨落潮悬浮, 涨憩、落憩期沉降的基本规律, 也较好地反映了泥沙浓度在表、底层间的差异。在测站 6 和 8, 涨落潮时泥沙从海底冲起, 近底泥沙浓度迅速从 0kg/m³ 上升到 30~50kg/m³。

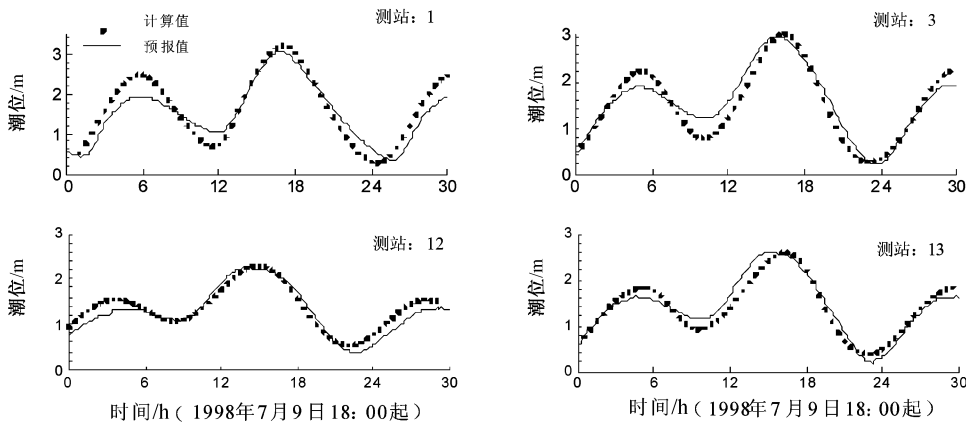


图2 计算潮位与实测潮位的比较

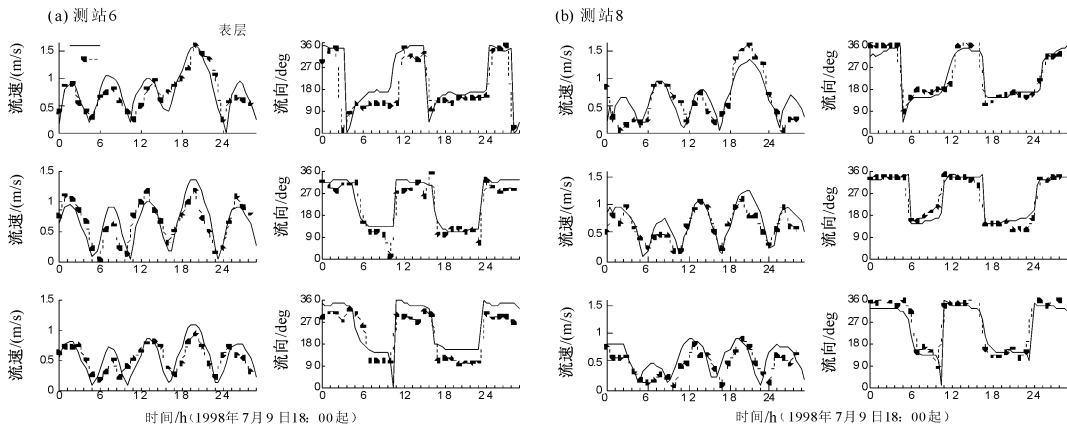


图3 测站 6、8 计算流速及流向与实测值比较

2 4 珠江口的泥沙运动特征 由于珠江口的入海口门众多, 泥沙运动规律十分复杂, 不但受由口门入海泥沙的直接影响, 还与潮流的抽送、泥沙悬浮- 沉积- 再悬浮过程及河口细颗粒泥沙的絮凝等运动与物理过程有关。图 6 显示了大潮过程中高潮、落潮和低潮期表层和底层的珠江口悬沙浓度分布。由图

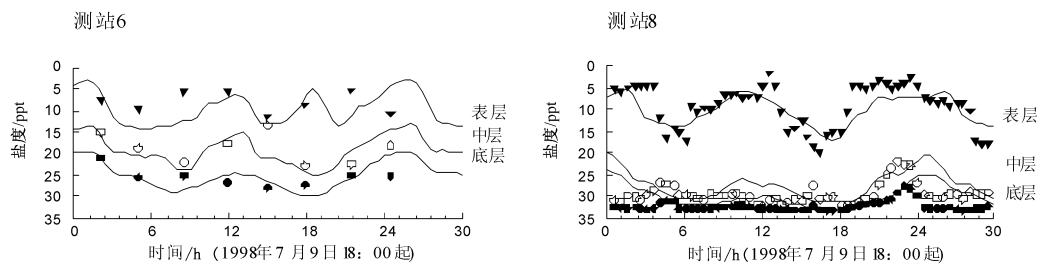


图 4 测站 6、8 计算盐度与实测值比较

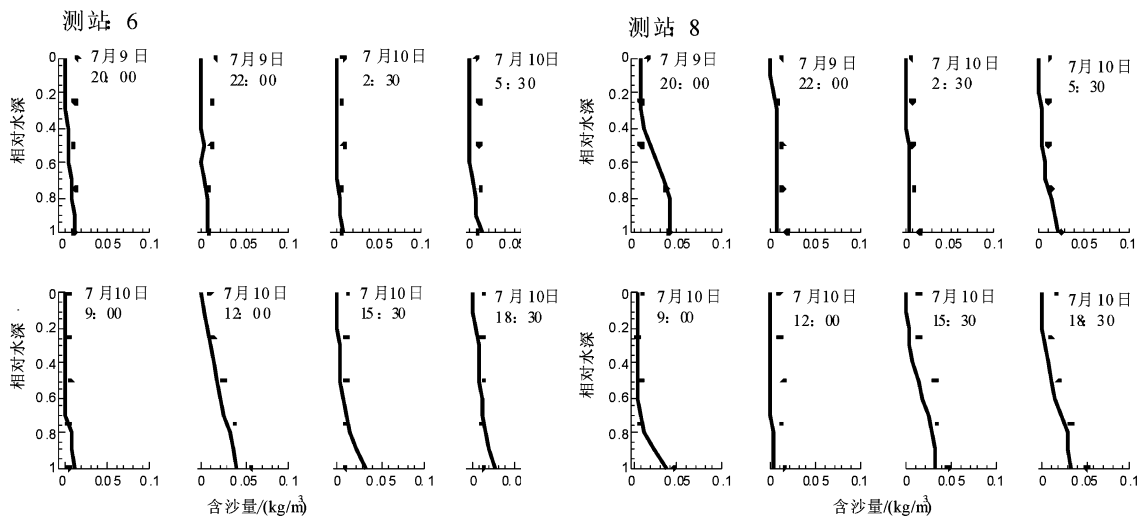


图 5 测站 6、8 计算悬沙浓度与实测值比较

可见, 珠江口主槽的含沙浓度小于浅水区, 受口门来沙的影响西槽含沙量大于东槽, 虎门附近含沙量较低, 香港水域泥沙浓度很小。落潮时, 在高潮时落淤的泥沙颗粒被再次冲起, 从洪奇门至淇澳岛东面形成一条相对浓度较高的高含沙带, 泥沙颗粒被带至主槽, 甚至输送至香港水域。

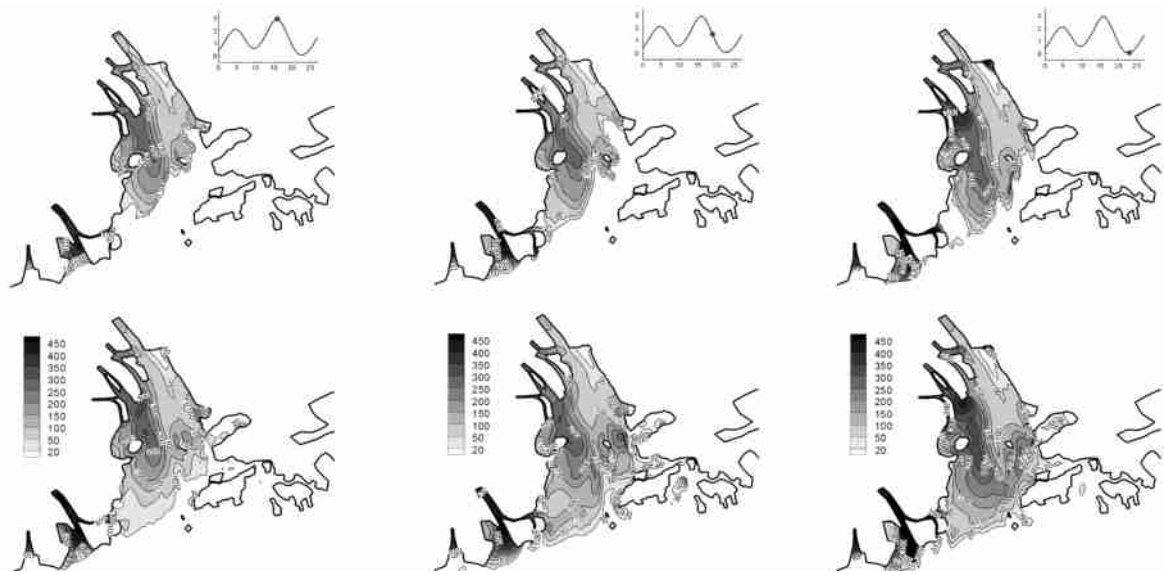


图 6 珠江口计算悬沙浓度分布

对计算的水流、盐度及含沙量等物理参数作多个潮周期的平均, 可以反映余流、盐水入侵与最大浑浊带等物理要素之间的相互关系。图 7 为经多个潮周期平均后得到的沿东、西槽主槽方向的余流、盐水

楔及最大浑浊带的垂向分布。图中可清楚地看到上层净流向海、下层净流向陆的重力循环水流结构,滞流点位于拦门沙的末端。受伶仃洋西面横门、洪奇门和蕉门的强大径流的影响,西槽的盐水入侵高度分层,而东槽受潮流的影响更大,所以表现为弱混合。

珠江口的最大浑浊带主要由重力循环和潮泵抽送引起^[7]。图 7 同时显示了珠江口的最大浑浊带,其位置与滞流点与盐水楔头部相对应。由于珠江口的地形极为复杂,最大浑浊带有其特殊性,在西槽有 2 个浑浊带,一个位于西槽的下部,符合部分混合河口最大浑浊带的基本特征;另一个由伶仃洋的西部口门的输入泥沙造成。

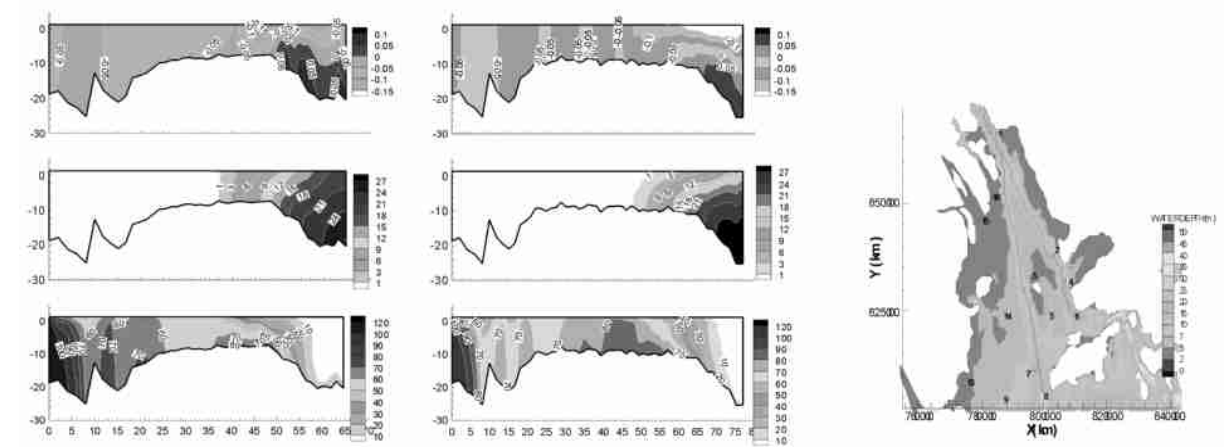


图7 珠江口东、西槽计算滞流点、盐水楔与最大浑浊带

3 认识与结论

本文提出了三维水动力和泥沙输移模型,并用于研究珠江口的水流及泥沙运动规律。通过对模型的验证和珠江口水沙基本规律的研究,可得到以下几点认识和结论:

(1) 本模型用破开算子法求解控制方程的方法是稳定和高效的,平面上采用 9 结点四边形有限单元法求解水平扩散项,可以适应河口地区的复杂地形边界,并具有二阶精度。模型耦合了 2.5 阶 Mellor-Yamada 紊流模型,并考虑水平密度梯度对水流影响的斜压项,有效提高了模型的计算精度。

(2) 用 1998 年 7 月的洪季实测潮位、潮流、盐度和含沙量资料对模型进行了验证,总体上各物理要素的计算值与实测值均符合良好,说明本模型能够良好地用于复杂河口的水流及物质输移的模拟研究。

(3) 计算分析了珠江口主槽的净流、盐水入侵及最大浑浊带之间的相互影响、相互对应的关系,发现主槽中存在着明显的重力循环,滞流点位于拦门沙的末端,其位置与最大浑浊带相对应。由于珠江河口的复杂地形条件,珠江口西槽的最大浑浊带有其独特性,西部口门输沙也会产生一个一般河口不常见的浑浊带。

参 考 文 献:

[1] O Connor B A, Nicholson J A. Mud Transport Modeling[A] . in Physical Processes in Estuaries[C] . Springer-Verlag, 1988. 532- 544.

[2] Katopodi I, Ribberink J S. Quasi- 3D Modeling of Suspended Sediment Transport by Currents and Waves[J] . Coastal Engineering, 1992, 18: 83- 110.

[3] Briand M H G, Kamphuis J W. Sediment Transport in the Surf Zone: a Quasi 3-D Numerical model[J] . Coastal Engineering, 1993, 20: 135- 166.

- [4] Cancino L, Neves, R. Hydrodynamic and Sediment Suspension Modeling in Estuarine Systems Part I: Description of the Numerical Models[J]. Journal of Marine Systems, 1999, 22: 105– 116.
- [5] Wu Y, Falconer R A. A Mass Conservative 3-D Numerical Model for Predicting Solute Fluxes in Estuarine Waters[J]. Advances in Water Resources, 2000, 23: 531– 543.
- [6] 田向平. 珠江口伶仃洋的最大浑浊带研究[J]. 热带海洋, 1986, (5) : 27– 35.
- [7] Wai W H Onyx, Wang C H, Li Y S. The Fomation Mechanisms of Turbidity Maximum in the Pearl River Estuary, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48: 411– 448.
- [8] Wang C H, Wai W H, Li Y S. Two-dimensional Characteristics of of Hydrodynamics and Sediment Transport in the Pearl River Estuary[A]. Proceedings of 29th IAHR Congress, Beijing, 2001, Vol. , 396– 401.
- [9] Chen Y, Wai W H Onyx, Li Y S, Lu Q M. Three-dimensional numerical modeling of cohesive sediment transport by tidal current in Pearl River Estuary[J]. Intemational Journal of Sediment Research, 1999, 14(2) : 107– 123.
- [10] Mellor G L, Yamada T. Development of A Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(4) : 851– 855.
- [11] Mellor G L, Oey L Y, Ezer T. Sigma Coordinate Pressure Gradient Errors And the Seamount Problem[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15: 1122– 1131.
- [12] Rodi W. Turbulence Models and Their Application in Hydraulics[M]. IAHR Monograph Series, Third Edition, The Netherlands, 1993.
- [13] Lu Q M, Wai W H. An Efficient Operator Splitting Scheme for Three-dimensional Hydrodynamic Computations[J]. International Journal for Numerical Methods in fluids, 1998, 26: 771– 789.
- [14] Jiang Y W. Three dimensional Numerical Modelling of Sediment and Heavy Metal Transport in Surface Waters[D]. Ph. D Thesis of the Hong Kong Polytechnic University, 2003.

Three-dimensional modelling of sediment transport in the Pearl River Estuary

WANG Chong-hao¹, Onyx W.H. Wai²

(1 Dept. of Sedimentation, IWHR, Beijing 100044, China;

2 Dept. of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Kowloon, Hong Kong)

Abstract A three-dimensional baroclinic model of 9-node quadrilateral elements with second order accuracy for hydrodynamics and cohesive sediment transport is introduced in this paper. The operator-splitting scheme is used to solve the governing equations: using the Eulerian-Lagrangian method for solving the horizontal advection terms; using the finite element method for horizontal diffusion terms; using the finite difference method for vertical diffusion terms. The Mellor-Yamada level 2.5 turbulence closure sub-model is coupled to get more reasonable vertical eddy viscosity and substance turbulence diffusion coefficient. The model was applied to simulate a 3-D suspended sediment transport in the Pearl River Estuary with a spring tide and a neap tide in wet season (July 1998). The computational domain of the simulation covers all the 8 outlets of the Pearl River. The model is validated with field data in terms of tidal levels, tidal flows, salinities and suspended sediment concentrations. The numerical results are in good agreement with the field data. In addition, based on the simulation results, some physical phenomena such as salinity intrusion, maximum turbidity in the Pearl River Estuary are discussed briefly.

Key words: three-dimensional baroclinic model; sediment transport; Pearl River Estuary; salinity intrusion; turbidity maximum

(责任编辑:李福田)