

# 珠江三角洲一维河网非恒定流悬沙预测模拟

张蔚,霍光,诸裕良

(河海大学海岸及海洋工程研究所,江苏 南京 210098)

**摘要** 在河网水流三级联合解法的基础上,利用“节点含沙量控制法”,假设节点处冲刷和淤积较小,所有节点的含沙量控制方程可以通过输沙量守恒方程用矩阵形式写出,求解该不规则的稀疏矩阵方程组,得到所有节点处的含沙量;单一河道断面处的含沙量通过单一河流悬沙输运的求解方法获得,从而建立珠江三角洲全流域悬沙预测模型,并用实测资料对该模型进行了率定和验证,验证结果良好.

**关键词** 珠江河网 悬沙 数学模型

**中图分类号** TV143

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-1980(2005)05-0542-04

珠江三角洲地区水系河网交错,水流受潮汐影响显著,其水动力问题历来受到许多学者的关注<sup>[1,2]</sup>.由于泥沙运动及分汊口处分沙的复杂性,珠江河网大范围的泥沙数值计算鲜有研究,但悬移质泥沙迁移研究是认识该地区环境演变规律的基础,因此最近几年有学者开始尝试,诸裕良提出了“节点含沙量控制法”,并成功地对西江、北江的分水分沙情况进行了数值模拟<sup>[3]</sup>.由于东江河网是整个珠江三角洲河网不可分割的一部分,只对西江、北江建立模型,并不能完全反映珠江河网系统的水沙运动情况.因此本文将东江与西江、北江联网,建立珠江河网大系统悬沙预测模型,并根据模拟结果对河网内泥沙的输移特征进行分析.

## 1 控制方程

河道非恒定流和悬沙输运可用圣维南方程组和非平衡悬沙输运方程来描述.

连续方程 
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial t} = q \quad (1)$$

动量方程 
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial Z}{\partial x} - u^2 \frac{\partial A}{\partial x} + g \frac{n^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

悬沙输运方程 
$$\frac{\partial (AS)}{\partial t} + \frac{\partial (QS)}{\partial x} = -\alpha B\omega (S - S_*) \quad (3)$$

式中:  $t$ ——时间;  $A$ ——断面面积;  $Q$ ——断面流量;  $q$ ——旁侧入流量;  $Z$ ——断面水位;  $B$ ——断面宽度;  $R$ ——断面水力半径;  $u$ ——断面平均流速;  $g$ ——重力加速度;  $n$ ——糙率;  $S$ ——断面平均含沙量;  $\alpha$ ——悬沙恢复饱和系数;  $\omega$ ——悬沙沉降速度;  $S_*$ ——断面平均挟沙能力,采用张瑞瑾挟沙能力公式<sup>[4]</sup>

$$S_* = K \left( \frac{u^3}{gR\omega} \right)^m \quad (4)$$

式中  $K, m$  为挟沙能力系数.

## 2 悬沙输运数学模型的求解

珠江三角洲河网河床年冲淤变幅较小,故采用非耦合求解法,即先通过三级联合解法<sup>[5]</sup>求出珠江三角洲河网的一维流场,再将三级联合解法的思路用到一维河网悬沙模型中,在流场已知的条件下,求解悬沙模型.

对于悬沙输运数值计算,采用逆风差分格式和 Preissmann 4 点隐性差分格式.根据流向,差分方程为

$$\alpha \alpha_i S_{i-1}^{n+1} + \beta \beta_i S_i^{n+1} = DD_i \quad Q_i > 0 \quad (5)$$

$$\beta\beta_iS_i^{n+1} + \gamma\gamma_iS_{i+1}^{n+1} = DD_i \quad Q_i < 0 \tag{6}$$

式中  $\alpha\alpha_i, \beta\beta_i, \gamma\gamma_i, DD_i$  为差分方程的已知系数.

基于河网水流的三级联合解法,河网中悬沙输运的求解方法与水流的求解方法类似.假设河流汉口节点在 1 个时步内冲淤较小,悬沙输运守恒公式为

$$\sum Q_{in,i}S_{in,i} = \sum Q_{out,i}S_{out,i} \quad S_{out,i} = S_j \tag{7}$$

式中  $S_j$ ——汉口节点处的含沙量;  $S_{out,i}$ ——流出节点的第  $i$  条河道节点处含沙量;  $S_{in,i}$ ——流入节点的第  $i$  条河道节点处含沙量;  $Q$ ——与含沙量相应的流量.

利用单一河道节点含沙量与断面含沙量的递推关系(式(8)、式(9)),得到上边界节点( $i = 1$ )和下边界节点( $i = n + 1$ )含沙量之间的关系式.

全顺流  $S_i^{n+1} = P_i + R_iS_1^{n+1} \quad (i = 1, 2, \cdots, n + 1) \tag{8}$

全逆流  $S_i^{n+1} = P_i + R_iS_{n+1}^{n+1} \quad (i = 1, 2, \cdots, n + 1) \tag{9}$

式中  $S_i^{n+1}$ ——上边界节点的含沙量;  $S_{n+1}^{n+1}$ ——下边界节点的含沙量;  $P_i, R_i$ ——递推系数,其求解要考虑单一河道水流流向<sup>[3]</sup>.

接着根据式(7)和边界含沙量条件,得到当前节点含沙量与相邻节点含沙量的关系式,则所有节点含沙量的控制方程为

$$AS = B \tag{10}$$

式中  $A$ —— $m \times m$  维系数矩阵;  $B$ ——已知向量;  $S$ ——待求向量(节点含沙量).求解式(10)<sup>[6]</sup>,得到所有河流汉口节点的含沙量,则所有单一河流的边界含沙量条件均已知.最终通过单一河流方程(8)和(9),可得到所有断面的含沙量  $S^{n+1}$ .

3 模型验证

图 1 是研究区域(西江、北江、东江流域)的平面图.在珠江三角洲河网悬沙预测模型中,有 340 个内部单一子河流,13 条边界河流,1497 个长度 0.2 ~ 2.0 km 不等的河段,1850 个计算断面和 216 个河流汉口节点,河流的总长度约为 1 600 km.本文模拟了 1998 年 7 月 18 日的洪水和 2001 年 2 月 7 ~ 16 日近 10 d 的枯水过程.上游边界条件以流量和含沙量形式在 5 个上游节点(石咀、高要、石角、南河道、博罗)处给出,东江的增江作旁侧入流考虑,下游边界条件为潮位过程(黄冲、西炮台、黄金、灯笼山、横门、万顷沙、南沙、大虎).在给定断面上,糙率系数随水深变化,且不同河流有不同的值,珠江流域取 0.01 ~ 0.04.挟沙能力系数  $K$  和  $m$  分别取 0.005 和 0.92,以 2 min 的时间步长进行计算.图 2 和图 3 是珠江河网内悬沙的含沙量过程验证图.从计算结果看,悬沙浓度的平均误差基本上小于 25%,表明该模型可用于珠江河网悬沙输运预测的数值模拟.

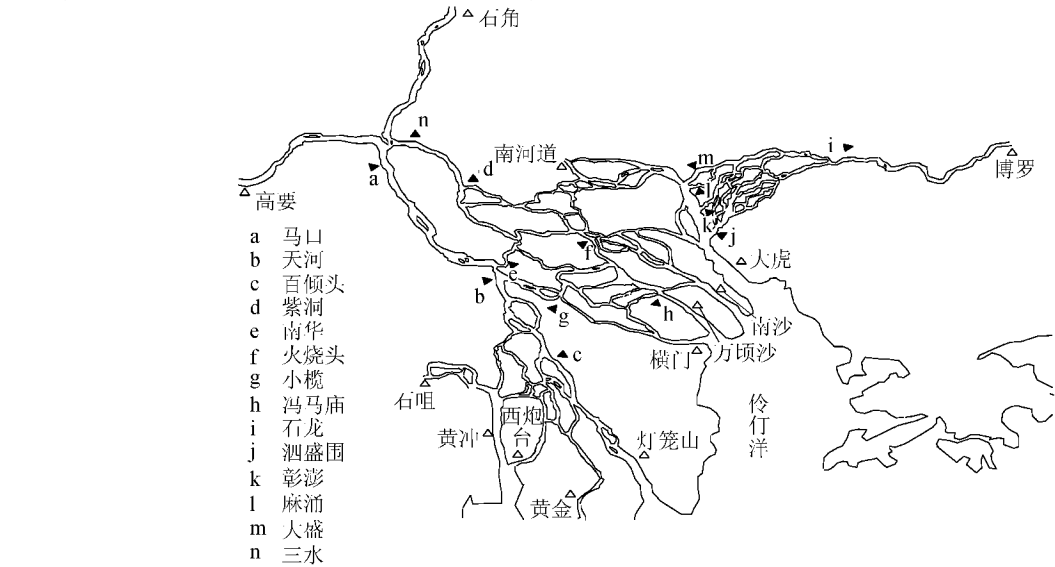


图 1 珠江三角洲河网平面图  
Fig.1 Map of Pearl River network

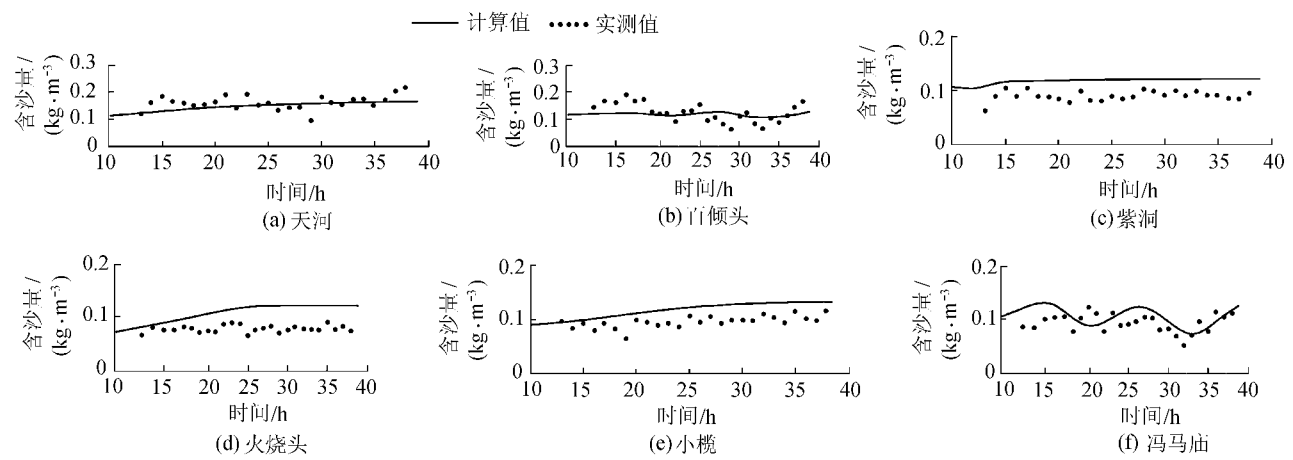


图 2 1998 年 7 月 18 日含沙量过程线

Fig.2 Comparison of sediment concentration for July 18,1998

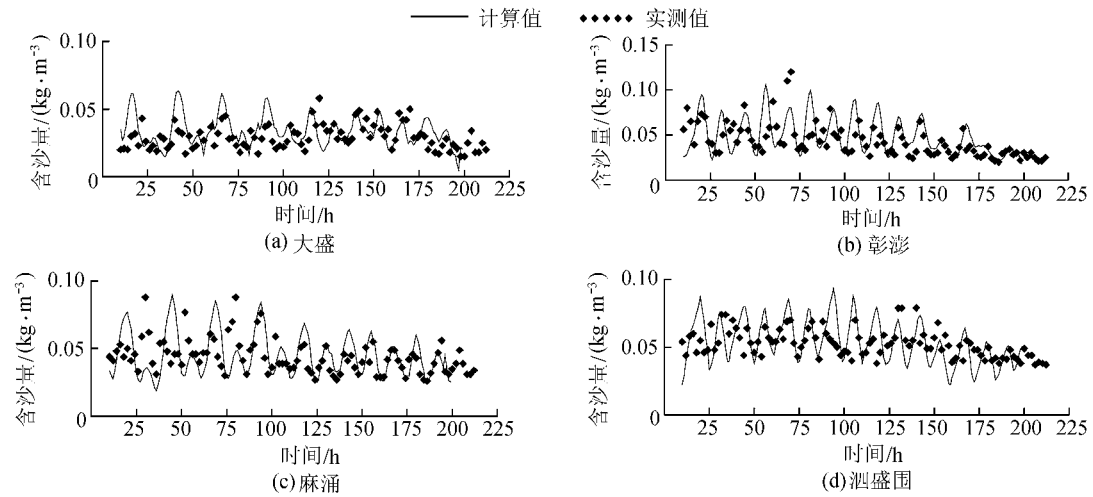


图 3 2001 年 2 月 7 ~ 16 日含沙量过程线

Fig.3 Comparison of sediment concentration for Feb.7-16,2001

4 珠江河网悬沙输移特征分析

西江泥沙从马口站往下游汉道分配,以马口站 1998 年 7 月 18 日一个全潮期内输沙量计算值为 100% 计,天河站平均输沙量占马口站的 55.28%,南华站平均占 40.26%。北江泥沙以三水站一个全潮期内输沙量计算值为 100% 计,主要节点处紫洞输沙量占三水总输沙量的 26.28%。东江泥沙从石龙站往下,从东江的南干流和北干流分配,南干流和北干流的输沙量分别占总和的 51.02% 和 48.98%。表 1 是一些主要节点的分流、分沙比。模拟结果表明,4 个分汉河段的分沙比与相应的分流比非常接近,说明珠江三角洲河网以径流输沙为主,天河、百倾头右及火烧头左等分支为主要水沙输送通道。东江石龙南北干流输水输沙能力十分接近。

表 2 表明,2001 年 2 月 7 ~ 16 日枯水,在计算的 200 多 h、9 个全潮期的时间内,涨潮平均输沙率略大于落潮平均输沙率,但由于落潮历时比涨潮历时长,因此落潮的输沙量大于涨潮的输沙量(只有彰澎断面相反)。而 2003 年 6 月 13 ~ 14 日洪水,在模拟的 1 个全潮期内,落潮平均输沙率大于涨潮平均输沙率(麻涌相反),

表 1 1998 年 7 月 18 日洪水珠江河网主要节点分流、分沙比

Table 1 Ratios of flow and sediment at the main junction of Pearl River network on July 18, 1998

| 河 网  | 分沙比   | 分流比   | 河 网  | 分沙比   | 分流比   |
|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 南 华  | 43.51 | 47.40 | 火烧头左 | 69.56 | 81.82 |
| 天 河  | 56.49 | 52.60 | 火烧头右 | 30.44 | 18.18 |
| 百倾头左 | 43.02 | 47.94 | 石龙北  | 48.98 | 56.28 |
| 百倾头右 | 56.98 | 52.06 | 石龙南  | 51.02 | 43.72 |

且落潮历时比涨潮历时长,因此落潮的输沙量大于涨潮时的输沙量.两个计算时段,东江 4 口门都呈现泥沙下泄现象,其中麻涌涨落潮时的输沙率和总输沙量最小,泗盛围最大,其输沙量在涨落潮期间基本能占到东江 4 个口门总输沙量的 40%,甚至更多.计算时段内,4 口门流出东江三角洲进入狮子洋和虎门口的悬移质沙量分别为 0.78 万 t 和 3.04 万 t,其中大部分是通过大盛和泗盛围断面出去的.枯水期由于受潮流顶托作用更强,涨落潮时不同时段的面断面输沙量不同,但各站(除彰澎外)净输沙量均为正值,这一现象进一步证明了主要干流中的径流及其挟带的泥沙对珠江三角洲的演变起主导地位,而潮流及其挟带的泥沙处于次要地位.

表 2  2001 年枯水期东江 4 口门输沙率及其分配

Table 2  Calculated results of sediment transport rate and its distribution at four east outfalls during the low water period of 2001

| 时段                  | 地点  | 涨潮平均<br>输沙率/<br>(kg·s <sup>-1</sup> ) | 落潮平均<br>输沙率/<br>(kg·s <sup>-1</sup> ) | 涨潮<br>输沙量/<br>万 t | 总涨潮<br>输沙量/<br>万 t | 各口门涨潮<br>输沙量分配<br>比/% | 落潮<br>输沙量/<br>万 t | 总落潮<br>输沙量/<br>万 t | 各口门落潮<br>输沙量<br>分配比/% | 净输沙<br>量/万 t | 4 个口门<br>总净输沙<br>量/万 t |
|---------------------|-----|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| 2001 年<br>2 月<br>枯水 | 大盛  | 41.54                                 | 37.56                                 | 1.34              | 10.28              | 13.0                  | 1.66              | 10.96              | 15.1                  | 0.32         | 0.78                   |
|                     | 麻涌  | 18.19                                 | 15.23                                 | 0.58              |                    | 5.6                   | 0.67              |                    | 6.1                   | 0.19         |                        |
|                     | 彰澎  | 72.45                                 | 52.24                                 | 2.37              |                    | 23.0                  | 2.30              |                    | 21.0                  | -0.07        |                        |
|                     | 泗盛围 | 182.91                                | 144.05                                | 5.99              |                    | 58.4                  | 6.33              |                    | 57.8                  | 0.34         |                        |
| 2003 年<br>6 月<br>洪水 | 大盛  | 116.12                                | 267.29                                | 0.33              | 1.67               | 19.7                  | 1.64              | 4.71               | 32.8                  | 1.31         | 3.04                   |
|                     | 麻涌  | 35.78                                 | 31.54                                 | 0.10              |                    | 6.1                   | 0.19              |                    | 4.0                   | 0.09         |                        |
|                     | 彰澎  | 116.28                                | 177.05                                | 0.37              |                    | 22.2                  | 1.02              |                    | 21.7                  | 0.65         |                        |
|                     | 泗盛围 | 269.02                                | 323.16                                | 0.87              |                    | 52.0                  | 1.86              |                    | 39.5                  | 0.99         |                        |

5  结    论

- a. 本文在“节点含沙量控制法”的基础上,建立了珠江三角洲大系统的悬沙预测模型,验证结果良好,可用于珠江河网内悬沙输移运动的预测.
- b. 利用该模型对珠江河网内部的悬沙输移特征进行模拟分析.珠江河口区的泥沙主要来自陆相径流挟带的下行泥沙和随潮流挟带的上溯泥沙,其中,径流及其挟带的泥沙是珠江三角洲建造过程中的主要动力和物质.
- c. 河网内部主要节点的分沙比与分流比接近,进一步说明珠江三角洲河网是以径流输沙为主的平原河网.

参考文献：

[1] 李毓湘,逢勇. 珠江三角洲地区水动力模型研究[J]. 水动力学研究与进展,2001,16(2):143—155.  
[2] 彭静,何少荃. 珠江三角洲大系统洪水模拟分析及防洪对策探讨[J]. 水利学报,2003,(11):78—84.  
[3] 诸裕良,严以新. 一维河网非恒定流及悬沙数学模型的节点控制法[J]. 水动力学研究与进展,2001,16(4):503—510.  
[4] 张瑞瑾,谢鉴衡,王明甫,等. 河流动力学[M]. 北京:水利电力出版社,1989.20—35.  
[5] 张二骏,张东生,李挺. 河网非恒定流三级联合算法[J]. 华东水利学院学报,1982,10(1):1—13.  
[6] 李岳生. 河网非恒定流隐式方程组稀疏矩阵解法[J]. 中山大学学报(自然科学版),1977,(2):21—27.

Prediction model for suspended-sediment transport in  
unsteady flow in Pearl River network

ZHANG Wei, HUO Guang, ZHU Yu-liang

(Research Institute of Coastal and Ocean Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** Based on the three-stage method, a numerical model for suspended-sediment transport in the whole Pearl River Basin was developed by use of the node control method for sediment concentration. It was assumed that the erosion and deposition at the nodes was little, and that the control equations for the sediment concentration at all nodes could be written in the matrix form according to the sediment conservation equation. The sediment concentration at each node was obtained by solution of irregular sparse matrix equations. Furthermore, the sectional sediment concentration of single rivers was calculated with the algorithm for single river suspended-sediment transport. The parameters of the model were calibrated and verified with measured data, and the result was satisfactory.

**Key words** Pearl River network; suspended-sediment; numerical model