

一维潮流与含氯度耦合数学模型及其应用

刘俊勇, 张 云, 崔树彬

(珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要 针对东江三角洲的实际情况, 建立一维潮流与含氯度耦合数学模型, 通过对东江下游及其三角洲供水水源工程 8 个基本布置方案的对比分析, 定量计算不同方案对水动力条件、咸潮界的影响。结果表明: 该模型能较好地模拟潮流与含氯度的变化, 可为东江三角洲河网区河道治理、城市供水工程建设等相关问题的研究提供科学依据及技术支撑。

关键词 一维潮流; 含氯度; 耦合数学模型; 东江三角洲; 供水水源工程

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2009)03-0006-05

One-dimensional coupled mathematical model of tidal current and chlorinity and its application

LIU Jun-yong, ZHANG Yun, CUI Shu-bin

(Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract A one-dimensional coupled mathematical model of tidal current and chlorinity (OCTC) is put forward in order to simulate the actual situation of the East River Delta. Through comparison of the eight layouts of the water supply projects in the downstream and delta areas of the East River, the impacts of different projects on hydrodynamic conditions and the salty tidal boundary were calculated quantitatively. The results prove that the changes of tidal current and chlorinity can be reasonably simulated in the model, and the scientific and technical support can be provided for river regulation and urban water supply project construction in the tidal river networks region of the East River Delta.

Key words one-dimensional tidal current; chlorinity; coupled mathematical model; the East River Delta; water supply project

为了保障东江下游三角洲河网区的水环境安全, 拟兴建水利枢纽工程变双向流为单向流, 控制下游咸潮及污水随潮上溯, 达到拒污、压咸的目的, 以满足河网区的供水需求。由于河网区水动力过程复杂, 在该地区建设水利枢纽工程将改变河网区水动力条件, 因此建设前需要对工程建设所改变潮汐动力引发潮量、潮位、咸潮界变化等问题进行研究。数学模型由于投资少、运行周期短和效率高, 具有较好的通用性和复演性, 重复模拟时具有理想的抗干扰性, 因而日益成为研究潮流、泥沙及含盐度运动规律的一个强有力的手段。多年来, 许多专家学者在珠

江三角洲地区开展了相关的研究工作, 如陈晓宏等^[1-3]对水沙数学模型进行了研究, 徐峰俊等^[4]对珠江河口区水环境整体数学模型进行了研究^[4]; 刘俊勇等^[5]开展了珠江口门近期整治工程对含氯度影响及施工期悬浮物输送数学模型分析研究。这些模型的研究无疑对珠江三角洲河道治理、防洪减灾及水资源保护具有重要的应用价值。

本文针对水利枢纽建设方案确定中所涉及的潮流与含氯度模拟这一难点和重点问题, 建立一维潮流与含氯度耦合数学模型(以下简称 OCTC 模型), 计算分析东江下游及其三角洲供水水源保证工程不同建设方案对东江三角洲和狮子洋水动力环境及咸

基金项目: 水利部“948”计划资助项目(200740), 国家自然科学基金(50679075)

作者简介: 刘俊勇(1973—), 女, 内蒙古五原人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学、河流数值模拟、防洪评价、河流生态修复技术研究。E-mail: ljiy_eco2005@163.com

潮活动规律的影响,分析不同布置方案及南支流与北干流压咸与冲污流量的调配对东江三角洲及狮子洋潮位、涨落潮量及咸潮上溯的影响,从水动力学的角度比选出较优的工程布置方案。

1 OCTC 模型基本原理

1.1 基本方程

潮流连续方程:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \tag{1}$$

潮流动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + S_f \right) + u_1 q = 0 \tag{2}$$

式中: Z 为断面平均水位; Q 、 A 、 B 分别为断面流量、过水面积、水面宽度; x 、 t 为距离和时间; q 为旁侧入流或取水流量,正值表示流入,负值表示流出; β 为动量校正系数; g 为重力加速度; S_f 为摩阻坡降,采用曼宁公式计算, $S_f = g/C^2$, $C = h^{1/6}/n$; u_1 为单位流程上的侧向出流流速在主流方向的分量。

含氯度对流-扩散输送方程:

$$\frac{\partial (A\rho)}{\partial t} + \frac{\partial (Q\rho)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_k \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = S_m \tag{3}$$

式中: ρ 为含氯度; D_k 为河段纵向离散系数,由经验公式求得,确定方法可参阅文献[6]; S_m 为源、汇项;其余符合同上。

1.2 河网区汉口连接条件

河网区内汉口点是相关支流汇入或流出点,汉口点水流、含氯度要满足下列连接条件:

流量连接条件:

$$\sum_{i=1}^m Q_i = 0 \tag{4}$$

水位连接条件:

$$Z_{i,j} = Z_{m,n} = \dots = Z_{l,k} \tag{5}$$

($i, m, \dots, l$ 为支流号; $j, n, \dots, k$ 为断面号)

含氯度连接条件:

$$\sum_{i=1}^m Q_i \rho_i = \bar{\rho} \sum_{j=1}^n Q_j \tag{6}$$

式中: Q_i 为汉口节点第 i 条支流流量,流入表示正,流出表示负; $Z_{i,j}$ 为汉口节点第 i 条支流上 j 号断面的平均水位; ρ_i 为汉口节点第 i 条入注支流含氯度; $\bar{\rho}$ 为汉口节点流出的所有支流平均含氯度。

1.3 初始和边界条件

初始条件:

$$(Z)_{t=0} = Z_0 \quad (Q)_{t=0} = Q_0 \quad (\rho)_{t=0} = \rho_0 \tag{7}$$

边界条件:

$$\begin{aligned} (Z)_r &= Z(t) \quad (Q)_r = Q(t); \\ (\rho)_r &= \rho(t) \end{aligned} \quad r \text{ 为边界} \tag{8}$$

模型上边界采用上游实测流量过程线 $Q = Q(t)$,下边界采用出海口附近实测潮位过程线 $Z = Z(t)$ 和含氯度过程 $\rho = \rho(t)$ (本文采用上下边界具体位置见后文 2.1 节介绍)。

1.4 水闸模拟

河网区中的水闸断面由于水动力不连续,圣维南方程已不再适用,这里将水闸作为内边界处理。水闸处满足以下条件:

流量连续条件:

$$Q_j^{n+1} = Q_{j+1}^{n+1} \tag{9}$$

动量守恒条件:

$$Q_j^{n+1} = f(Z_j^{n+1}, Z_{j+1}^{n+1}, Z_{j0}, e) \tag{10}$$

(e 为开度, Z_{j0} 为初始水位)

$$\text{含氯度连续条件: } \rho_j^{n+1} = \rho_{j+1}^{n+1} \tag{11}$$

1.5 方程求解

方程离散采用 4 点加权 Preissmann 固定网格隐式差分格式。求解采用已较为成熟的河网三级联解算法。

2 模型率定与验证

2.1 研究范围

研究范围包括东江三角洲、广州水道及北江三角洲。上边界取在北江三角洲顺德水道的甘竹溪电站、小榄水道的南华、北江干道的三水、广州水道的老鸦岗、东江干流的惠阳和增江的麒麟咀水文(位)站,下边界取至伶仃洋虎门、蕉门、洪奇门及横门潮位站。由于资料所限,模型分大小两个模型,大模型研究范围见图 1(图示范围即为模型的边界位置),主要研究潮流,小模型研究范围为图 1 中狮子洋以东的东江三角洲范围,重点研究含氯度。大模型共设 2561 个断面,模拟河道长度约 1225 km,河道模拟断面间距约 500 m。

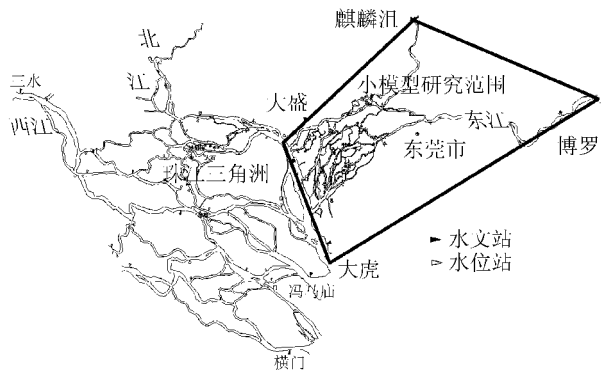


图 1 模型研究范围图

2.2 模型计算边界

大模型的计算边界采用广东省水利水电勘测设计研究院在东江三角洲第 1 期(2004 年 3 月 21~28 日)测量的成果,本次测量数据最为齐全,而且东江

三角洲工程附近布设了许多水文测点(博罗站平均流量为 $252\text{ m}^3/\text{s}$,不但接近东江 95% 通航流量 $236\text{ m}^3/\text{s}$,而且能反映出枯季水文条件下的水动力、含氯度变化规律),该大模型用于模型率定和验证,以及工程水动力影响的计算。

大模型具体边界取值为:①流量边界,其中博罗为 $180\text{ m}^3/\text{s}$ (从博罗站平均流量 $252\text{ m}^3/\text{s}$ 中扣除同时间段内东深日平均抽水流量 $69.4\text{ m}^3/\text{s}$ 及博罗~石龙沿岸各镇水厂日平均抽水流量 $2.9\text{ m}^3/\text{s}$);沙河为 $3\text{ m}^3/\text{s}$;石马河为 $10\text{ m}^3/\text{s}$;麒麟咀为 $38\text{ m}^3/\text{s}$ 。②水位边界有大虎、南沙、横门、冯马庙、老鸦岗、南华、三水,采用资料为 2004 年 3 月 15 日 0:00~4 月 6 日 0:00 共计 528 h 的实测数据。③其他一些水闸如西南闸等,离工程较远则采用其多年平均流量。

对于含氯度计算,由于大模型研究范围内缺少同期实测资料,则采用东江小模型进行计算,其水流、含氯度边界条件全部采用 2001 年 2 月 8 日 0:00~16 日 0:00 共计 200 h 的实测数据。

2.3 参数率定与验证成果

模型参数率定主要采用珠江三角洲 1999 年 7 月中水实测水文资料。同时又采用东江三角洲 2004 年 3 月实测的较为详细水文资料对东江三角洲片的参数进行了复核调整。为了使模型适用于枯季大潮水文条件计算,又选用珠江三角洲 2001 年 2 月枯季大潮典型水文资料对模型进行验证。

模型验证精度控制以交通部 JTJ/T 233—98《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》为标准。限于篇幅限制,部分潮位、流量及含氯度率定和验证成果见图 2~3。糙率在 0.016~0.035 之间。从图 2、图 3 可

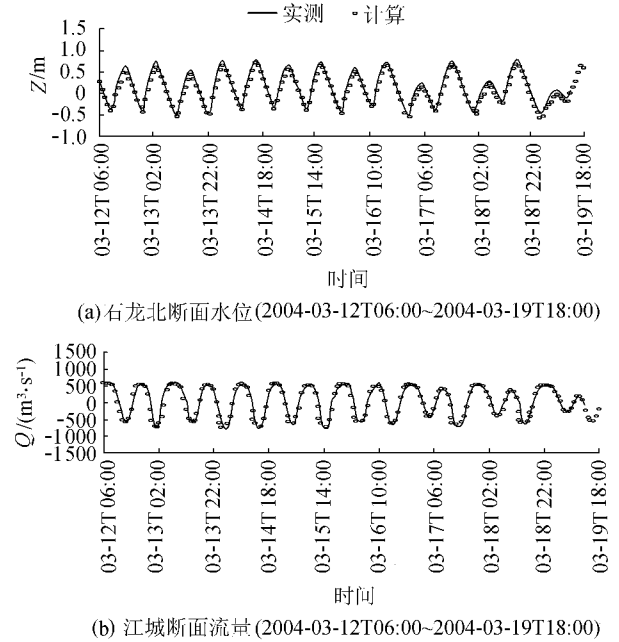


图 2 2004 年 3 月水位流量验证成果

见模型计算的流量过程线、潮位过程线和含氯度与实测资料基本吻合。模型可以用于东江三角洲的工程方案水动力及含氯度计算。

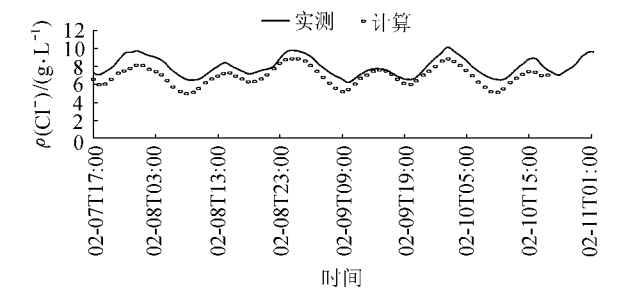


图 3 2001 年 2 月含氯度(氯离子质量浓度)验证成果

3 模型应用

3.1 东江三角洲及工程方案概况

在珠江三角洲水系中,东江三角洲相对自成体系,通过狮子洋与广州水道相通,与北江三角洲分隔在狮子洋两岸,水体联系不甚紧密。东江三角洲以石龙为顶点,由南或西南的支流走向组成辐射状河网区,河网密度为 $0.6\text{ km}/\text{km}^2$,属珠江三角洲河网密度最大的区域,石龙以下的东江三角洲面积约为 1380 km^2 (东江三角洲水系组成见图 4)。河网区水流汇入狮子洋口门的河道主要有 4 个,即东江北干流、麻涌水道、倒运海水道及东江南支流(也称东莞水道)。东江三角洲地处亚热带,高温湿润多雨,多年平均降雨量 $1621\sim1852\text{ mm}$,年平均蒸发量在 $1250\sim1700\text{ mm}$ 之间,平均约为 1500 mm ,降雨量与蒸发量在区域分布上,一般西南多东北少。在下边界潮流动力和上边界径流动力综合作用下,东江三角洲河口区,洪水期潮流界最低可退至口门附近,潮区界可退至斗朗、上屯一带,枯水期潮流界在鲤鱼洲上下,潮区界在铁岗附近,枯、汛期潮区界和潮流界移动范围达 50 km 。珠江河口伶仃洋的潮差虽小,但进潮量大。东江三角洲的咸潮界跟博罗站的来流量密切相关。近年来,三角洲河段河床变形也很明显。河床下切造成河道边界发生变化,潮位下降造成潮区界、潮流界、咸潮界的位置发生变化。特别是 20 世纪 80 年代末以来,河床的下切、潮流运动的增加,造成潮区界、潮流界、咸潮界上溯。

针对东江下游及其三角洲河段供水任务十分繁重和近年来东江下游和三角洲河槽急剧下切给水资源利用和水利工程运行带来一系列问题等情况,东莞市规划在东江三角洲东莞地段建设控制性枢纽,变双向流为单向流,控制下游咸潮及污水随潮上溯。现需要对东江下游及其三角洲供水水源保证工程 8 个基本布置方案进行比较,工程分布参见图 4,各方案工程布置如下:①在永太、曲海、水蛇涌、江城、草

0.015 m/s 以内。方案 1 落急流速减少 0.01 ~ 0.05 m/s ,方案 4 落急流速减少 0.04 ~ 0.1 m/s ,方案 6 落急流速减少 0.031 ~ 0.07 m/s ,方案 7 落急流速减少 0.19 ~ 0.25 m/s ,方案 2、3、5、8 落急平均流速减少在 0.02 m/s 以内 ,工程方案对流速的影响随着工程布置的下移而增大。可见 ,工程完工后狮子洋出口虎门水道潮流输沙动力有所减弱 ,特别是方案 7 及方案 4、6 对虎门水道潮流输沙动力的影响相应较大。从维护狮子洋及下游潮汐通道的稳定和保持潮流输沙动力的角度 ,方案 1、2、3、5、8 好于其他方案。

d. 对东江河网区水动力条件的影响。通过工程方案对东江河网区落潮平均流速的影响计算成果分析发现 :工程方案对东江河网区水动力的影响主要是工程建设切断了下游潮流的上溯 ,抬高工程上游水位 ,使上游潮流区的潮流动力特性转变成径流。在枯水期 ,上游径流流量小而水位抬高 ,使工程上游河道流速明显减小。而在工程下游 ,由于上游纳潮容积减少 ,使潮流的上溯通量减少 ,其涨落潮流速也相应减少。工程方案对东江河网区流速的影响随着工程布置的下移而增大。同样 ,有工程后水闸上下游河道水流输沙动力有所减弱。

3.3 工程方案对咸潮的影响分析

a. 对咸潮上溯的影响。在枯水水文条件下 ,工程方案对控制东江河网区咸潮界面上溯有一定的作用。概括来讲 ,若各方案水闸闸址在工程前的东江咸潮界下游 ,则工程后 ,东江流域的咸潮界可往河口方向下移 1 ~ 2 km ,若各方案水闸闸址在工程前的东江咸潮界上游 ,则工程建成后 ,东江流域的咸潮界可控制在闸址处。从历史资料分析 ,在博罗上游来流量减小、狮子洋发生天文大潮、或发生台风使河口水位壅高、甚至是这些条件一起发生时 ,咸潮将上溯很远 ,严重影响东江三角洲区域的生活和工农业用水。因此从拒咸角度考虑 ,各水闸的位置应该越往下游 (靠近河口)越好。建闸后 ,闸上游可以从根本上解决咸潮入侵问题。

工程方案对狮子洋上游河段咸潮界面上溯的影响主要是东江三角洲纳潮量减少 ,而广州水道黄埔涨潮量增加 ,引起广州水道的咸潮界面上溯。当工程方案离东江河口较远时 ,在水闸处涨潮流也相应减弱 ,因而工程方案对广州水道的咸潮上溯影响不大 ,上溯距离增加的幅度在 1 km 以内。工程方案对广州水道咸潮界面上溯的影响随着工程布置的下移而增大 ,工程方案越靠下 ,东江三角洲纳潮容积减少的越多 ,广州水道的潮汐动力增强的越多 ,咸潮上溯到广州水道的距离会越远。从对广州水道的咸潮界影响来说 ,方案 1、2、3、5、8 较为合适 ,其中 ,方案 3

的影响最小。

b. 南支流建闸对咸潮的影响。从计算成果分析 ,在南支流上设置水闸后 ,将南支流咸潮界拦截在水闸下游 ,由于水系相联通 ,北干流的咸潮上溯情况有所变化 ,当上游石龙来水流量小于 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 ,北干流的咸潮上溯情况有所加强 ,但其咸潮界的影响在 500 m 以内。当上游石龙来水流量大于 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时 ,北干流的咸潮上溯情况却有所减弱 ,其咸潮界下移 ,其影响值随着北干流之分流的加大而加大。从总体上看 ,南支流建闸基本不会影响北干流刘屋洲的取水。

4 结 语

本文建立了东江三角洲一维潮流与含氯度耦合数学模型 ,并利用近年实测水文资料对模型进行率定和验证 ,验证结果满足应用的精度要求。最后利用该模型对不同工程方案对东江三角洲水动力条件、咸潮界等方面的影响进行了定量分析 ,可以反映工程影响的基本规律 ,分析结果为工程建设方案的确定提供了科学的依据。该模型可为东江三角洲河网区河道治理、防洪减灾、水资源保护、城市供水工程建设等提供技术支撑。

参考文献 :

- [1] 陈晓宏 ,陈永勤 ,赖国友.珠江口悬浮泥沙迁移数值模拟[J].海洋学报 ,2003 ,25(2):120-127.
- [2] 徐峰俊 ,刘俊勇 ,伶仃洋海区二维不平衡非均匀输沙数学模型[J].水利学报 ,2003(7):16-21 ,29.
- [3] 赖永辉 ,谈广鸣 ,曹志先.珠江采沙河段水沙数学模型研究[J].水动力学研究与进展 :A 辑 ,2007 ,22(2):168-174.
- [4] 徐峰俊 ,朱士康 ,刘俊勇.珠江河口区水环境整体数学模型研究[J].人民珠江 ,2003(5):12-18.
- [5] 刘俊勇 ,徐峰俊 ,朱秋菊.珠江口门近期整治工程对含氯度影响及施工期悬浮物输送数学模型研究分析[J].人民珠江 ,2006(6):45-47 ,67.
- [6] 顾莉 ,华祖林.天然河流纵向离散系数确定方法的研究进展[J].水利水电科技进展 ,2007 ,27(2):85-89.

(收稿日期 :2008-04-08 编辑 :徐娟)

