

珠江三角洲河网与伶仃洋

一、三维水动力学模型联解研究

逢 勇,黄智华

(河海大学环境科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 建立了珠江三角洲河网区一维非恒定流水动力学数学模型,并根据实测资料对模型进行了率定验证.利用伶仃洋水域三维水动力学模型的研究成果,采用时段交替法对一、三维模型进行了耦合计算.利用 1978 年 7 月在珠江三角洲河网区和伶仃洋区同步实测的水文资料对耦合模型的计算结果进行率定验证,结果表明,模型计算值无论在珠江三角洲河网区、交接断面以及伶仃洋区均与实测资料吻合较好,该模型可用来描述珠江三角洲河网区和伶仃洋区的水动力学过程.

关键词 数学模型 水动力学模型 耦合计算 珠江三角洲 伶仃洋

中图分类号 TV143 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)01-0010-04

珠江三角洲位于中国广东省南部,是珠江水系西江、北江、东江下游的冲积平原,珠江三角洲河网区水流通过虎门、蕉门、洪奇门、横门与伶仃洋相连,香港位于伶仃洋的东南角、澳门位于伶仃洋的西南角,整个珠江三角洲河网区和伶仃洋区位于粤、港、澳之间,该区域的水环境等问题历来为粤、港、澳所关注.由于珠江三角洲河网与伶仃洋之间水流相互贯通、连为一体,故从水流特性出发,应将珠江三角洲河网和伶仃洋视为整体进行研究,而过去这样的整体研究工作开展甚少.目前,该水域水污染问题日益突出,为了统筹考虑该水域的水环境保护工作,有必要建立珠江三角洲河网和伶仃洋耦合的水环境数学模型.水环境数学模型的基础是水动力学数学模型.由于珠江三角洲河网区水系复杂,本文采用一维河网水动力学模型对该区域水动力学过程进行描述.伶仃洋属开阔水域,采用三维水动力学模型进行描述^[1].

1 一维河网基本方程组求解方法

1.1 模型基本方程

描述水流在明渠中运动的一维非恒定流基本方程组如下:

连续性方程
$$\frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

运动学方程
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + g \frac{u|u|}{C^2 R} = 0 \quad (2)$$

式中: H ——断面水位; Q ——流量; u ——平均流速, $u = \frac{Q}{S}$ (S 为河道过水断面面积); g ——重力加速度; B ——不同高程下的过水宽度; q_L ——旁侧入流流量; R ——水力半径; C ——谢才系数; x, t ——位置和时间坐标.

1.2 模型求解方法

对河网非恒定流基本方程组采用一种按隐式计算的 3 级联合解法,即将参加计算的方程分成微段、河段、汉点 3 级,逐级处理,再联合运算,求得河网中各微段断面的水位、流量等值.具体如下^[2].首先利用节点方程组求得各河道首、末断面流量值,再求得各河道首、末断面水位值,然后据河道微段差分方程组的递推关系式解得河道各微断面的水位、流量值 H_{i+1} 和 Q_{i+1} .另外采用 Muler 法^[3]给出的嵌套迭代法提高计算精度.

1.3 模型的建立及率定

1.3.1 计算区域概况

计算区域东起东江的博罗、增江的麒麟嘴,北起流溪河的老鸦岗、北江的三水、西江的马口,西起西江的天河,南边为伶仃洋的四口门(从东至西依次是虎门、蕉门、洪奇门和横门)。计算河网区范围约 2 000 km²,计算区域内水道纵横交错,主要河汊 100 多个,河道总长 1 000 多公里。计算区域内主要河流为东江三角洲的东江北干流、东江南支流、中堂水道、道窖水道等,广州河道的流溪河、前航道、后航道、黄埔航道、虎门水道等,西北江三角洲的顺德水道、佛山水道、东平水道、容桂水道、陈村水道、沙湾水道、市桥水道、驷岗水道、潭州水道、小榄水道、鸡鸭水道等。

1.3.2 河网概化

河网区内共概化河道 180 条,汉点 112 个,划分河道断面 575 个,外边界 16 个(其中 6 个为水位边界,分别为老鸦岗、天河、虎门、蕉门、洪奇门、横门,10 个流量边界分别为博罗、麒麟嘴、三水、马口和 6 个水闸),具体的河网概化情况见文献[6]。

1.3.3 珠江三角洲流域河网水动力学模型率定

采用 1968 年 6 月 27 日(丰水期)、1982 年 3 月 25 日(枯水期)同步实测的一个完整潮周期 16 个边界点的水位、流量资料,对所建立的珠江三角洲河网水动力学模型进行率定,计算时的时间步长为 1 min,空间步长为 200~14 000 m 不等。水位验证断面为黄埔、大盛、泗盛、三沙口水位站监测资料,对每一条河道的糙率值分别进行率定,得河道糙率值为 0.014~0.032。

2 三维水动力学基本方程组及求解方法

2.1 基本方程组

运动学方程 x 方向分量：

$$\frac{\partial q_{kx}}{\partial t} + u_k \frac{\partial q_{kx}}{\partial x} + v_k \frac{\partial q_{kx}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2h_k \nu_k \frac{\partial u_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_k \nu_k \frac{\partial u_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h_k \nu_k \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + h_k \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_k \frac{\partial u_k}{\partial z} \right) - gh_k \frac{\partial \eta}{\partial x}$$
$$q_{kx} = u_k h_k$$

运动学方程 y 方向分量：

$$\frac{\partial q_{ky}}{\partial t} + u_k \frac{\partial q_{ky}}{\partial x} + v_k \frac{\partial q_{ky}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(h_k \nu_k \frac{\partial u_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(h_k \nu_k \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2h_k \nu_k \frac{\partial v_k}{\partial y} \right) + h_k \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_k \frac{\partial v_k}{\partial z} \right) - gh_k \frac{\partial \eta}{\partial y}$$
$$q_{ky} = v_k h_k$$

连续性方程：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sum_1^N \left(\frac{\partial q_{kx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{ky}}{\partial y} \right) = 0$$

式中： u_k ——第 k 层上 x 方向的水流速度； v_k ——第 k 层上 y 方向的水流速度； h_k ——第 k 水层的厚度； N ——垂直方向的分层数； η ——自由表面的高度； ν_k ——第 k 层的动力粘滞系数； g ——重力加速度。

基本方程组的求解方法见文献[4,5]。

2.2 计算范围及网格划分

三维模型计算的上边界为伶仃洋的东四口门,下边界为淇澳岛—内伶仃岛—赤湾一线,总面积约 700 km²。模型计算的水平空间步长 $\Delta x = \Delta y = 400$ m 垂直方向采用相对坐标,分为 3 层,计算时间步长为 1 s。

3 一、三维水动力模型联解及计算结果分析

3.1 联解方法

3.1.1 连接基本条件

一维与三维模型连接的基本断面共有 4 个,分别为虎门、蕉门、洪奇门和横门。设一维在第 i 个连接断面

上的水位、流量值分别为 $Z_i^{(1)}$ 和 $Q_i^{(1)}$, 三维在第 i 个连接断面上的水位、流量值分别为 $Z_i^{(2)}$ 和 $Q_i^{(2)}$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 则连接基本条件是在连接断面上的水位、流量值连续, 表示如下:

$$z_i^{(1)} = z_i^{(2)} \qquad Q_i^{(1)} = Q_i^{(2)}$$

3.1.2 连接断面选取

为了使连接断面的计算结果在模型耦合计算时具有一定的响应特性, 扩大一维和三维模型的计算范围, 使其有一个相交区域, 将相交区域的上边界和下边界作为一、三维模型耦合的连接断面.

3.1.3 一、三维模型耦合计算方法

由于连接断面属于一维河道的某一断面, 而在一维河道连接断面处通常嵌有多个三维模型网格点, 本文在一维河道断面处嵌入多个三维模型网格点的水位、流速值, 并假定在同一水平面相等, 而在垂直方向有变化, 具体变化值根据三维模型的计算结果得到. 一、三维模型耦合的计算过程如下: 采用时段交替法进行一、三维模型的耦合计算. 在初始时段 $0 \sim \Delta T_1$ 进行一维模型计算, ΔT_1 时段末将一维模型计算出的流速(流量)结果耦合给三维模型, 作为三维模型的边界条件. 在 $\Delta T_1 \sim \Delta T_2$ ($\Delta T_2 = \Delta T_1 + \Delta T_1$) 时段进行三维模型计算, ΔT_2 时段末将三维模型的计算结果耦合给一维模型, 作为一维模型的边界条件. 在 $\Delta T_2 \sim \Delta T_3$ ($\Delta T_3 = \Delta T_2 + \Delta T_1$) 时段再进行一维模型计算, 计算结束后将连接断面处的计算结果再赋给三维模型. 如此循环往复, 直至计算终止.

3.2 联解计算结果分析

利用 1978 年 7 月 6 日在珠江三角洲河网区及内伶仃洋区同步观测的水位、流量资料进行模型的计算及验证工作. 模型边界处资料为: 河网外边界的两个水位站(老鸦岗站、天河站)、4 个流量站(博罗、麒麟嘴、三水、马口)和 6 个水闸的同步实测水位或流量资料. 伶仃洋淇澳岛—内伶仃岛—赤湾一线同步实测水位资料. 模型计算结果验证断面资料为珠江三角洲河网区黄埔、大盛、泗盛、三沙口的同步实测水位资料, 一、三维模型耦合处虎门、横门、冯马庙、南沙站的同步实测流量资料, 伶仃洋中 6 个测点的同步实测水位资料. 伶仃洋中部测点的水深计算值和实测值的对比见图 1, 一、三维耦合处虎门流量计算值和实测值的对比见图 2. 从图 1、图 2 可见计算值与实测值基本吻合(相对误差在 15% 之内).

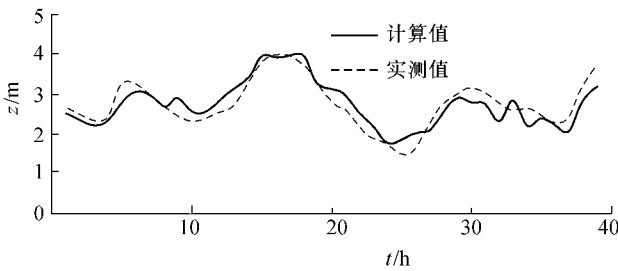


图 1 伶仃洋 2 号测点水深计算值和实测值对比
Fig.1 Comparison of calculated and measured data of water depth at No.2 measuring point in Lingding Sea

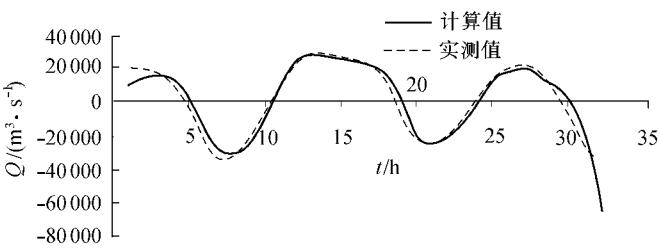


图 2 一、三维边界处虎门站流量计算值与实测值对比
Fig.2 Comparison of calculated and measured data of discharge at Humen station on the 1-D and 3-D boundaries

4 结 语

采用时段交替法对珠江三角洲一维河网和伶仃洋三维水动力学数学模型进行了联解计算, 并用实测资料对模型计算值进行了验证, 结果表明, 计算值无论在珠江三角洲河网区、交接断面以及伶仃洋区均与实测资料吻合较好, 该模型可用来描述珠江三角洲河网区和伶仃洋区的水动力学过程.

参考文献:

[1] LI C W. Numerical investigation of turbulent shallow recirculating flow by a quasi-three-dimensional $k-\epsilon$ model[J]. Int J Numer Methods Fluids, 1996, 23: 485—501.

[2] 张二骏. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学院学报, 1982, 10(1): 1—13.
[3] 溪梅成. 数值分析方法[M]. 合肥: 中国科学技术出版社, 1995. 60—100.
[4] LAUNDER B E, SPAULDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. Comput Methods Appl Mech Eng, 1974, 3: 269—289.
[5] YANENKO N N. The method of fractional steps[M]. New York: Springer, 1971. 28—50.
[6] 逢勇. 珠江三角洲河网入伶仃洋污染物通量计算研究[J]. 水利学报, 2001, (9): 40—45.
[7] BENQUE J P, CUNGE J A, FEUILLET J, et al. A new method for tidal current computation[J]. J Waterways Harbours Div, ASCE, 1981, 108: 396—417.

Coupling solution of 1-D hydrodynamic model for the river network of Pearl River Delta and 3-D hydraulic model for Lingding Sea

PANG Yong, HUANG Zhi-hua

(College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : A 1-D unsteady flow hydrodynamic numerical model is developed for the river network region of the Pearl River Delta, and the model is calibrated with the measured data. The research result of the 3-D hydrodynamic model for the Lingding Sea is used and coupled with the 1-D model for the Pearl River Delta network, and a coupling model is generated. Then, the time interval alternative method is used for model calculation. The calculated results by the coupling model are calibrated with the hydrological data synchronously measured in the Pearl River Delta region and Lingding Sea region in July, 1978. The good agreement of the calculated results with the measured data of the Pearl River Delta network region, Lingding Sea region, and their intersecting regions shows that the model can be used to describe the hydrodynamic process of these regions.

Key words : numerical model ; hydrodynamic model ; coupling calculation ; Pearl River Delta ; Lingding Sea

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登本校在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

本刊创办于 1957 年,是我国中文核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得全国优秀高校自然科学学报二等奖,以及中国期刊方阵“双效期刊”、全国水利系统优秀期刊称号。

本刊每逢单月出版,国内外公开发行。邮发代号 28-63,每期定价 3.00 元,全年订费 48.00 元。欢迎广大读者在全国各地邮局订阅或直接与编辑部联系。联系地址:南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部,邮政编码 210098。