

珠江口磨刀门整治前后水动力数值模拟

吕海滨¹, 吴超羽², 刘斌³

(1. 淮海工学院 空间信息科学系, 江苏 连云港 222001; 2. 中山大学 近岸海洋科学与技术研究中心, 广东 广州 510275; 3. 珠江流域水资源保护局, 广东 广州 510611)

摘要: 磨刀门是珠江的主要泄洪通道之一, 径流分配居珠江三角洲八大口门之首。利用磨刀门 1977 年地形 (大规模整治前) 和 2003 年的地形, 通过 ECOMSED 模型模拟了磨刀门海域洪枯季节水动力场, 对潮流、余流、潮能通量特性进行了对比, 发现整治后磨刀门水动力强度加大, 而且流速滩槽分异明显, 余流场与落潮流方向一致。20 世纪 70 年代, 余流自口门出来后在内海区右偏, 现在磨刀门水道余流偏向西部浅滩; 潮能通量密度加大, 滩槽分布差异明显。

关键词: 磨刀门; 数值模拟; 潮能通量; 潮流

中图分类号: P414 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 3096 (2006) 11-0058-06

近代电子计算机和数值计算方法发展起来的数值模拟技术对小量级影响因子的简化, 能基本真实地再现区域环境的动力现象, 在海岸工程、水运工程和环境工程中已被大量地使用。ECOMSED 模型是一个较完善的数值模拟系统, 能真实地模拟出海洋动力因素的变化规律及其作用下的动力 - 地貌过程。该模型在河口海岸地区得到广泛应用。

磨刀门河口区从 20 世纪 80 年代的大规模整治工程后, 河床形态变化很大。地貌的改变必然引起水动力的变化, 作者将探讨这种必然变化前后的差异性。图 1 是 1977 年和 2003 年的河床地形图。

1 模型介绍

ECOMSED 模型在海洋、近岸和河口区都已经得到了广泛的应用。水动力模块是 Blumberg 和 Mellor^[1]1987 年发展的基于静力和 BOUSSINESQ 假设下的原始海洋方程——三维的近岸海洋模型。

假设右手笛卡儿坐标系 (x, y, z) 建立在静止的海面上, 向东为 X 轴方向, 向北为 Y 轴方向, 垂直向上为 Z 轴方向。海水的自由表面定义在 $Z = \eta(x, y, t)$, 而海洋的底部定义在 $Z = -H(x, y)$ 。假设 $\vec{V}(U, V)$ 为水平流速矢量, ∇ 为水平梯度运算符, 连续方程可写成:

$$\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

雷诺动力方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla U + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial U}{\partial z}) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial V}{\partial z}) + F_y \quad (3)$$

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

其中, U 、 V 、 W 分别为流速在坐标轴 x, y, z 上的分量, t 为时间, ρ_0 为海水密度常数, ρ 是实际密度, g 是重力加速度, P 是压力, K_M 是垂向湍动能混合的涡粘系数, f 是随纬度变化的科氏力参数, F 为湍流粘滞力。

任一水深 z 处的压力是通过把方程 (4) 沿垂向从 z 积分至自由表面 η 得:

$$P(x, y, z, t) = P_{atm} + g \rho_0 \eta + g \int_z^0 \rho(x, y, z', t) dz' \quad (5)$$

收稿日期: 2005-11-11; 修回日期: 2006-03-02

基金项目: 国家重点基金资助项目 (40331007); 国家 973 计划资助项目 (2002CB412407)

作者简介: 吕海滨 (1979-), 男, 山东烟台人, 硕士, 主要从事河口、海洋水环境研究, 电话: 13861427903, E-mail: lhb2008_0@126.com

式中大气压力 P_{am} 视为常数。

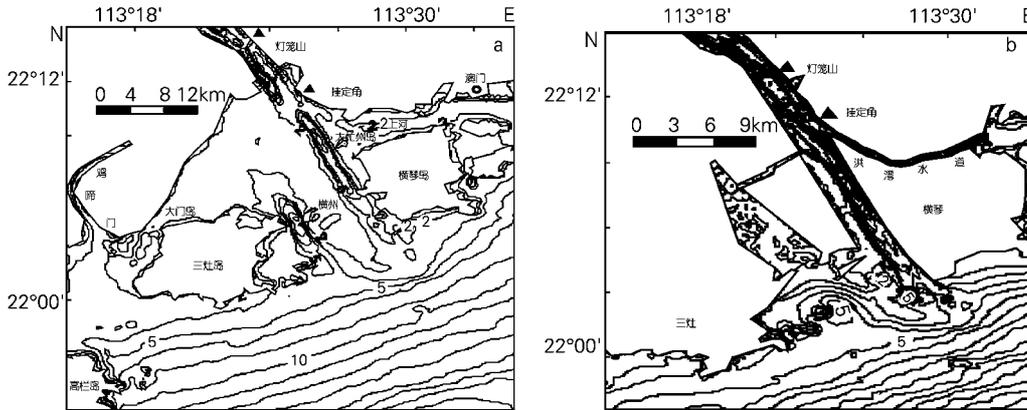


图1 磨刀门河口区地形图对比

Fig.1 Modaomen estuarine topography maps

a. 1977年地形; b. 2003年地形

a. estuarine in 1977; b. estuarine in 2003

2 模型计算与验证

运用 ECOMSED 二维水动力模块,对磨刀门河口水域二维流场进行了数值模拟,用相应时间的实测潮位为上游开边界控制水位,下游外海边界控制水位由三灶站的实测水位外推得到,为了便于洪、枯季比较,分别选取了 1977 年 6 月 27 日~1977 年 7 月 4

日,1977 年 12 月 10 日~1977 年 12 月 18 日,2003 年 12 月 9 日~2003 年 12 月 16 日,2004 年 7 月 30 日~2004 年 8 月 6 日的时间段进行了模拟;用实测潮位和实测流速的垂向平均值来验证,拟合效果非常好(图 2,图 3)。



图2 水位计算与实测对比(2003年12月)

Fig.2 Tidal-level simulation and hydro-survey tidal-level contrast(Dec.,2003)

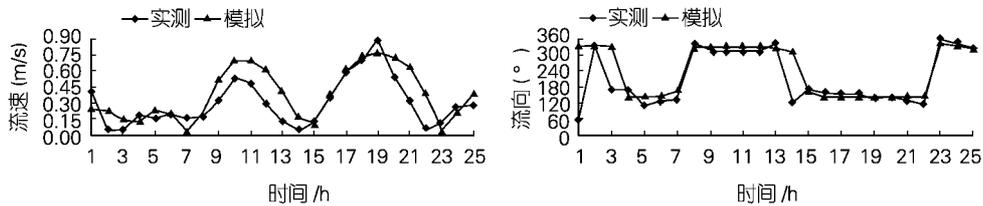


图3 流速计算与实测对比(1A站,2003年12月9日11时~10日11时)

Fig.3 Current velocity simulation and hydro-survey velocity contrast(1A station, 11 am, Dec.,9,2003~11 am,Dec.,10,2003)

3 结果分析

3.1 潮流

磨刀门属于径强潮弱型河口，拦门沙处于河口外。汛期洪水分别从龙屎窟、洪湾水道和磨刀门水道排出，洪季小潮或大潮中水位以下时，磨刀门河口段由径流控制。由于受西南向沿岸流的影响，磨刀门入海径流向偏西方向扩散。潮流向、流速随时间和空间变化而变化。由外海向陆，潮流椭圆沿程按照旋转流、半旋转流、往复流的规律变化，越往河道上游，潮流流向受径流、河槽地形作用越强，潮流表现为往复流的特点。

该分析利用了数值模拟技术模拟的 20 世纪 70 年

代和现代地形下的潮流场。洪季大潮期间，涨急时刻（图 4，图 5），70 年代，来自挂定角的径流量大，流速很大，径流与横州水道的涨潮流在大井角附近相遇，落潮流向西偏向内海区，向东分别由大柵州南北汉道进入马骊州水道，分别在马骊州水道中部、大井角西、大二门岛北形成汇潮点；现代地形下，横州水道的涨潮流很强，洪湾水道被来自澳门方向的和夹马口水道的涨潮流控制，无汇潮点。白龙河内部区涨潮流较强，经过横州岛南汉道进入横州水道的潮流比较强，夹马口水道的涨潮流加强。三灶站落急时刻（图 6，图 7），70 年代，来自灯笼山的强大径流在出口处幅散开来，一支进入上沟，一支沿横州水道深槽南下，剩下的在地转偏向力地作用下，进入西部内海区，

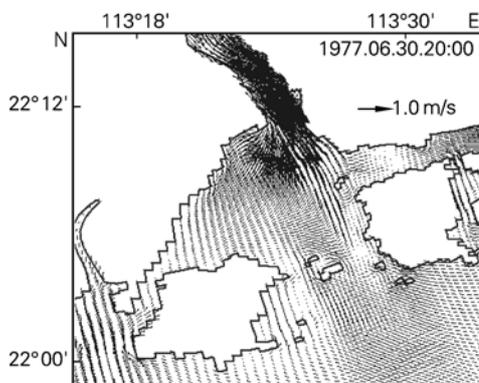


图 4 1977 年洪季大潮三灶站涨急时刻流场
Fig.4 1977 flood season spring tidal flood tide

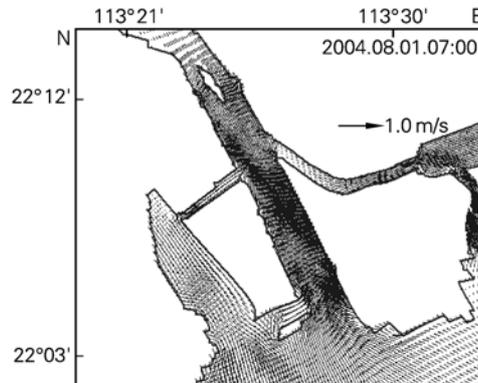


图 5 2004 年洪季大潮三灶站涨急时刻流场
Fig.5 2004 flood season spring tidal flood tide

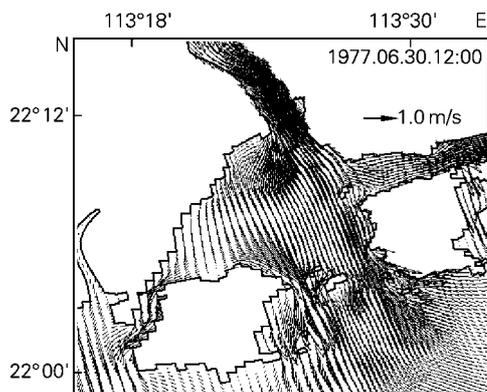


图 6 1977 年洪季大潮三灶站落急时刻流场
Fig.6 1977 flood season spring tidal flood tide

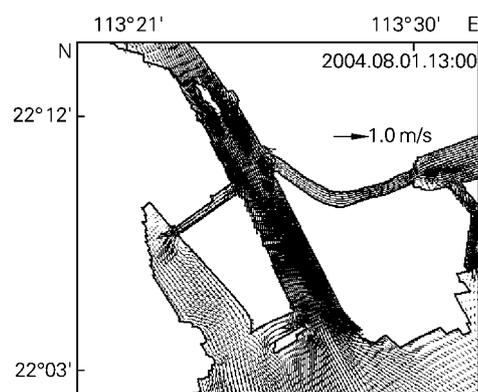


图 7 2004 年洪季大潮三灶站落急时刻流场
Fig.7 2004 flood season spring tidal flood tide

流速逐渐减小,在大二门水道、龙屎窟水道由于河道断面缩窄,水流辐聚,流速加大,喷射而出,整个内海区被落潮流控制。现在洪湾水道、磨刀门水道、十字门水道、鹤州水道的落潮动力很强,白龙河内部落潮流速相对较低,近年来,泥沙淤积严重。

枯季大潮期间,与洪季大潮期间对应潮时的相应流场类似。

3.2 余流

余流是指扣除周期性的潮流之后剩下的非周期性流的总称,它是细颗粒物远距离搬运的主动动力。磨刀门口的余流主要来源于径流、风及密度环流等,一般是径流愈丰富,余流强度愈大,因此余流总的来说是洪季大于枯季。

模拟了20世纪70年代与现代地形下洪、枯季中潮一个全潮周期(25h)平均的余流场。70年代无论是洪季还是枯季,整个研究区域余流场基本类似(图8,图9)。上游来水来沙流出挂定角后,在科氏力的作用下,向西部内海区偏转,给内海区带来了丰富的沙源。20世纪50年代末60年代初白藤堵海后,内海区西滩水动力强度减弱,泥沙淤积加快。余流场在速率上滩槽变化明显,深槽处更有利于泥沙输运。在大杧州岛附近余流强度较弱,利于泥沙的落淤。在大二门水道、龙屎窟水道、横洲水道、马骊洲水道四个出口处,余流强度变大,再向外海,余流速度逐渐变小,余流场流向始终指向外海,径流作用大于潮流作用。

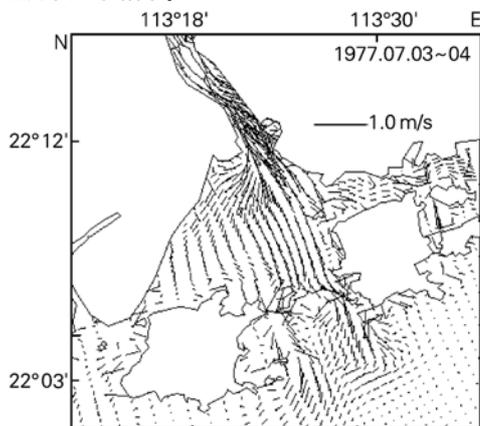


图8 1977年洪季余流场

Fig.8 1977 flood season residual current

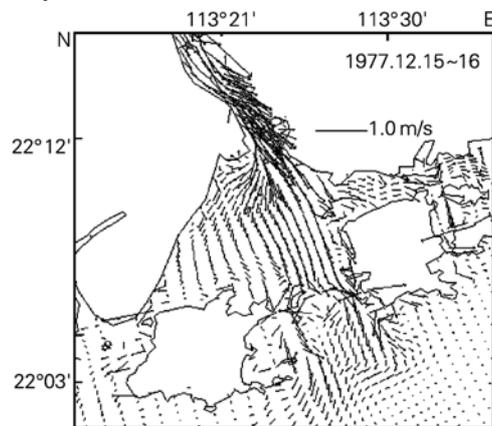


图9 1977年枯季余流场

Fig.9 1977 dry season residual current

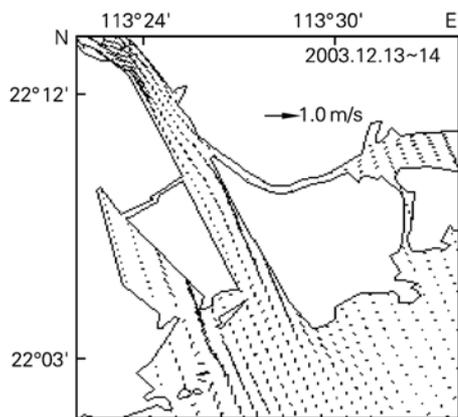


图10 2003年枯季余流场

Fig.10 2003 dry season residual current

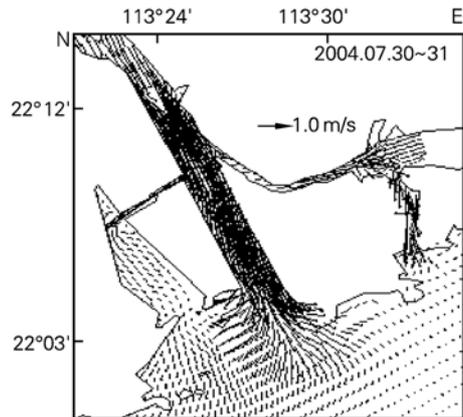


图11 2004年洪季余流场

Fig.11 2004 flood season residual current

现代地形下,洪、枯季余流场均是由陆向海的,但速率变化较大(图 10,图 11),洪季(2004 年 7 月)余流速率大于枯季(2003 年 12 月)。上游来水流出大井角口门后,在科氏力作用下,向西南方向输运。无论洪季还是枯季,白龙河内海区余流强度较弱,泥沙落淤严重。目前地形主要是在人类活动(如挖沙、疏浚等)的影响下,无论横洲水道还是洪湾水道河床深槽都经过加深,说明深槽的水动力强度加大,泥沙输运能力加强。在横洲水道内余流在科氏力作用下右偏,泥沙在西部浅滩上落淤,近年来有加剧之势。

3.3 潮能

潮能通量,是单位时间通过自海底至海面单位密度宽度断面的潮能。关于潮能通量的计算,国内外许多学者多是利用天文潮资料进行调和分析做出的,通过研究主要分潮如 $M_2, S_2, K_2, N_2, K_1, P_1, O_1$ 来计算潮能,

例如 Noel CARBAJAL 和 Jan O.BACKHAUS 对加利福尼亚湾的潮能进行过计算^[2], Cartwright and Ray^[3] 和 Le Provost and Lyard^[4] 研究了 M_2 分潮潮能在全世界范围内分布情况。方国洪^[5]、任杰^[6]等都对其进行过研究。其计算公式为^[2]:

$$\phi = -\frac{\rho_s g h}{T} \int_0^T \eta v dt \quad (6)$$

式中, v 和 ϕ 分别为流速和能通强度向量, η 为未扰动海面上的潮高, h 为未扰动水深, T 为潮波周期(25 h), ρ_s 为海水密度,在标准大气压下水密度变化范围较小(1 000 ~ 1 028 kg/m³),因此在计算潮能通量时间可以忽略海水密度的空间差异, g 为重力加速度, t 为模型外模块的时间步长。

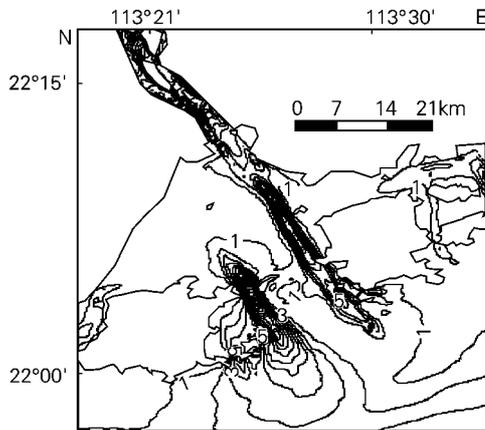


图 12 1977 年 7 月 3 日~4 日磨刀门河口潮能

Fig.12 Modaomen Tidal energy flux in 3th to 4th July 1977

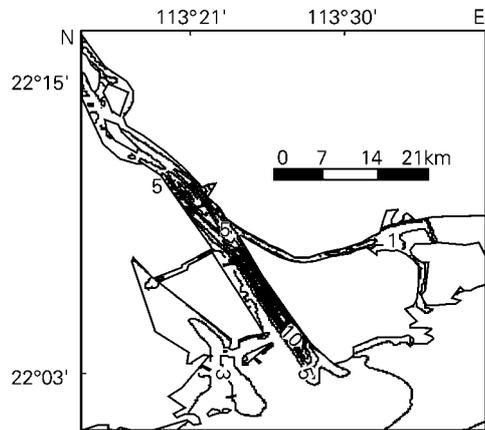


图 13 2004 年 7 月 30~31 日磨刀门河口潮能

Fig.13 Modaomen Tidal energy flux in 30th to 31th July 2004

模型在保证上游径流来水和外海潮波能量相同的前提下,利用不同年代海图和水文(水位)站的实测资料进行数值模拟,进而比较潮能通量密度由于地形改变而发生的空间分布上的变化。

磨刀门河口区两个年代中潮期间一个全潮周期平均的潮能通量(图 12,图 13)所示,等值线标记单位是 kW/m,从图 12 中可以看出,岛屿的空间组合类型对潮能通量的影响较明显,大杧州岛在内海区水域中起到沉积载体的作用,其附近水深较浅,在该处潮能通量强度弱,低能区遍布整个洪湾水道。而深槽

区,潮能通量相对较大。在龙屎窟峡口,由于地形缩窄,与潮流进退方向相同的地方潮能相对集中,自缩窄处地形向两侧放宽后,能量发生分散,潮能通量减弱。从图 13 可知,磨刀门水道东部深槽处的潮强比浅滩处的大一个数量级,深槽处最大可以达到 15 000 W/m,浅滩最低在 1000 W/m 左右,滩槽水动力强度相差悬殊,深槽处河道冲刷强烈,浅滩处的潮能通量密度较低,容易造成泥沙的落淤。近年来,磨刀门西滩淤积加剧,同一位置随着泥沙淤积河床变浅,潮能通量也减小。

4 结论

由于人类活动的影响, 现在的磨刀门河口与 20 世纪 70 年代相比, 河床深槽加深, 造成水动力强度变大, 滩槽分异明显; 70 年代上游来水出了口门在科氏力作用下向西部内海区偏转, 现代地形下, 上游来水在横洲水道右偏, 带来的泥沙在西部浅滩淤积, 而且近几年来有加剧之势; 洪季余流强度明显大于枯季, 造成枯季泥沙淤积, 洪季河道冲刷的局面; 潮能通量分布滩槽差异明显, 潮能通量在深槽处远大于浅滩处。

参考文献:

- [1] Blumberg A F, Mellor G L. Three-Dimensional Coastal Ocean Models[M]. Washington: American Geophysical Union, 1987,4:1-16.
- [2] Noel CARBAJAL, Jan O.BACKHAUS. Simulation of tides, residual flow and energy budget in the Gulf of California[J]. *Oceanologica Acta*, 1997, 21(3): 429-446.
- [3] Cartwright D E, Ray R D. Energetics of global ocean tides from Geosat altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991,96: 16 897 – 16 912.
- [4] Le Provost C, Lyard F. Energetics of the M₂ barotropic ocean tides: an estimate of bottom friction dissipation from a hydrodynamic model[J]. *Progress in Oceanography*, 1997, 40: 37 – 52.
- [5] 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1994,16(4):1-12
- [6] 任杰. 末次海进盛期以来珠江三角洲演变的长周期动力地形模型及应用[D]. 广州中山大学. 2003.

Hydrodynamic numerical simulation during the rebuilding of Modaomen Estuary of the Pearl River

Lü Hai-bin¹, WU Chao-yu², LIU Bin³

(1. Space Science and Technology Department of Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222001, China ; 2. Coastal Ocean Research Center of Zhongshan University, Guangzhou 510275, China ; 3. Pearl River Basin Water Resources Protection Bureau, Guangzhou 510611, China)

Received: Nov., 11, 2005

Key Words: modaomen ; numerical simulation ; tidal energy flux ; tidal current

Abstract : The “modaomen” is the main passage to flood discharge of the Zhujiang river, and its flow distribution was the top of the other passage of Zhujiang river to the sea. Since the 1960's, “modaomen” has been greatly renovated by human activities. Base on the chart of modaomen underwater topography in 1977 (before the river engineering) and 2003, through numerical simulation by use of ECOMSED ocean numerical model, both the hydrodynamic fields of modaomen in flood season and dried season are simulated, its tidal flow, residual flow and tidal energy flux have been analysed. The result shows that the hydrodynamic intensity in the eastern trough of Heng Zhou channel was amplified and the flow velocity in western shoal was low. Both the directions of the residual and ebb flow were identical in one tidal period. During the 1970's, residual flow turned right when come out of the river mouth; Now the residual of modaomen turns to the western shoal. The depth and velocity are the main factors which determine the intensity of tidal energy. In the same location, along with the sediment filling up of the river bed, the tidal energy decreases.

(本文编辑: 谭雪静)