

珠江口虎门小尺度动力结构及鳧洲水道对其影响的数值研究*

唐兆民¹, 包芸^{1,2}, 任杰¹, 吴超羽¹

(1. 中山大学近岸海洋中心, 广东 广州 510275;

2. 中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

摘 要: 应用 Ecomsed 模式, 对黄埔—内伶仃区域采用曲线网格技术, 从动力机制上分析珠江口虎门小尺度动力结构, 结果表明: 虎门上、下游呈现双向、不对称射流体系; 鳧洲水道的西侧注入射流体, 严重影响着虎门的动力、沉积系统; 落潮时, 高浓度的悬浮泥沙通过鳧洲水道, 绕过鸡抱沙向东南呈舌状注入伶仃洋。

关键词: Ecomsed; 模式; 虎门; 鳧洲水道

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2005) 05-0088-05

虎门是珠江河口湾伶仃洋海区的潮汐优势型河口, 双向射流体系是珠江口虎门独具特色的动力、沉积系统。由于独特而典型的地貌单元‘门’及其相连的地形边界条件、复杂的水动力条件, 造就了虎门特殊的动力结构: 在基岩夹峙下, 上、下游水面放宽, 由于口门上、下游的狮子洋与伶仃洋有巨大的纳潮量, 在口门形成典型的涨、落潮双向不对称射流体系, 这与一般河口的单向射流, 无论是在机制上还是在形态上有显著差异^[1,2]。

华南河口地区存在着一系列罗斯贝数从 1~10 的小尺度动力结构, 包括密度环流、峡口射流、水平环流等。除附壁射流 (Wall jet) 外, 大多数类型的射流其全部周界都是流体, 使得射流具有不受固体边界制约的自由度, 所以它和管道或明槽中流动所表现的性质截然不同^[3,4]。

近 50 多年来关于射流理论与作用机制的系统探讨都是针对单向射流而言, 对于虎门不对称的双向射流这种独特的河口流动现象, 在国际地貌、河口海岸、海岸工程等领域尚鲜有涉及。本文针对虎门的动力结构与各种时间尺度的动力沉积过程进行了初步的研究。

本文应用 Ecomsed 模式, 对黄埔—内伶仃区域采用曲线网格技术, 结合 1998 年的实际水深和 863/818 ‘珠江河口海洋环境立体监测技术示范’ 项目中 1999 年 7 月航次水文、泥沙等资料, 进行空间高分辨率的数值模拟, 从动力机制上分析珠江口虎门小尺度动力结构和鳧洲水道对虎门双向射流体系影响。

1 研究区域

本文的研究区域 (图 1) 包括珠江干流, 东四口门和内伶仃岛区域。北起黄埔码头, 南到内伶仃岛南至淇澳岛一线, 西起横门, 东至赤湾。南北长约 77.7 km, 东西宽 50 km。

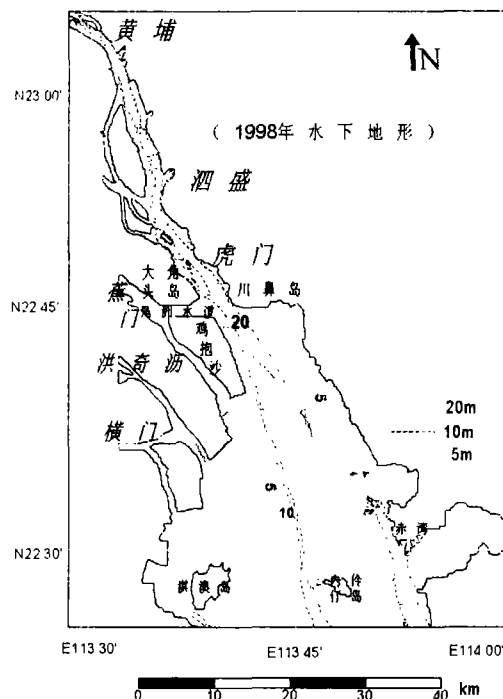


图 1 研究区域

Fig.1 Study area

* 收稿日期: 2004-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40331007, 40406016); 国家“973”计划资助项目 (2002CB412407)

作者简介: 唐兆民 (1969 年生), 男, 博士; 通讯联系人: 包芸; E-mail: stsby@zsu.edu.cn

2 伶仃洋曲线网格生成技术

随着计算机技术的发展,数值模拟技术已成为水动力学研究的有力工具。由于网河区山丘、台地星罗棋布,水道纵横、交错成网,所以采用曲线网格技术,弥补正方形网格的不足,从而提高计算精度和局部空间分辨率,较好地拟合岸线。

对于复杂的外形,为了变换成规则形状,首先根据拉普拉斯方程进行微分变换,使微分坐标特别适合于复杂和不规则的边界;再根据泊松方程调整网格的间距,使研究关心的区域局部加密,从而减小数值误差,保证解的稳定^[5]。

从图1中可见,黄埔至伶仃洋包含有东四口门的河道,伶仃洋河口湾中的西槽。在曲线网格中要保证这些典型的地形位置基本上是沿同一网格走向,这样才能在模拟计算中较好地反映水动力的流动特性,而且研究的主要目标是虎门口的双向射流体系,这就要求在虎门口区域网格要加密,其余区域网格略粗,这样既能满足局部区域的高分辨率要求又可以减小计算量,提高运算效率。

图2给出了黄埔至伶仃洋区域的曲线网格。为了保证西槽为一条连贯的网格,网格生成是分区进行的,并采用了拼接技术使整个研究区域的网格对应相连。网格在虎门口附近及狮子洋和伶仃洋中部射流区较密,网格步长大约为150 m。其它区域网格的最大步长大约过度到400 m左右。

3 水动力计算

本文采用 Ecomsed 模式对虎门上、下游包括狮子洋和内伶仃洋在内区域,进行了二维模拟计算,并对原程序作了相应的改进,在原模式的基础上增加了二维泥沙模块程序。Ecomsed 是在海洋 POM 模式及其后来发展的浅海 ECOM 模型的基础上发展起来的, Ecomsed 的模式包括6大部分:2D/3D 内外水动力模块,3D 粘性与非粘性泥沙输运模块,床沙示踪模块,溶解质示踪模块,悬浮颗粒输移模块以及风浪模块。所有模块都采用相同的计算网格和计算框架,垂向上采用 σ 坐标。水动力模块就是 ECOM 模型,在该动力模块中藕合湍流封闭模块求解垂向湍流粘滞和扩散系数,水平湍流粘滞和扩散系数基于 Smagorinsky's 参数化方法^①。

二维悬沙运输方程为:

$$\frac{\partial Hs}{\partial t} + \frac{\partial uHs}{\partial x} + \frac{\partial vHs}{\partial y} + \alpha\omega(s - s^*) = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon H \frac{\partial s}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon H \frac{\partial s}{\partial y})$$

式中, u 、 v 分别为水流速度东、北分量, $H = h + \eta$ 为水深, h 为静水深, η 为潮位, s 为水中含沙量浓度, ϵ 为悬沙扩散系数, s^* 、 α 、 ω 分别为水流夹沙能力、恢复饱和系数和悬沙沉降速度。

研究滩槽演变的动边界技术则采用干湿判断法。当实际水深小于 10 cm 时,则定为露出水面的滩地。

基本计算条件设定如下:开边界选取 1999 年 7 月的潮位资料。黄埔、泗盛、南沙,万顷沙西、横门的潮位资料为 1999 年 7 月的实测资料,大盛站则根据水文站日测量的天文潮位用 3 次样条插值到整点。外海边界以原先 500 m 网格八大口门的计算结果插值得到。计算时间为 1999 年 7 月 16 日 0 点到 24 日 0 点。时间步长为 6 s。图 3 为落潮流场分布图。

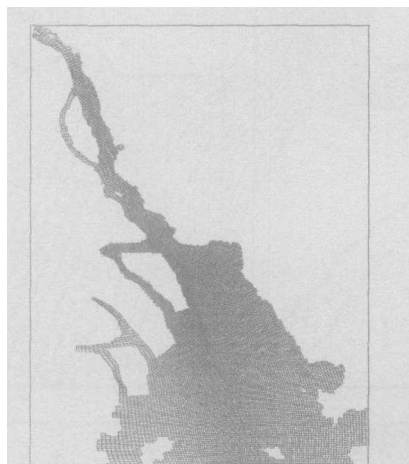


图2 计算网格
Fig.2 Computed grid

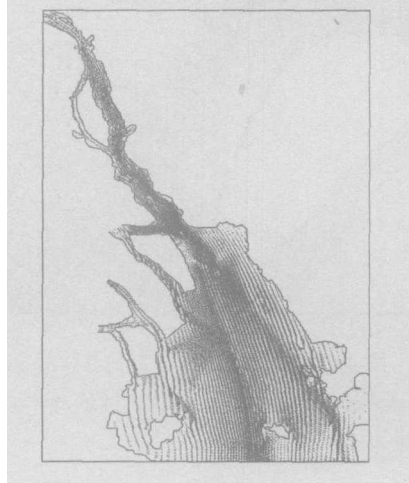


图3 落潮流场分布

Fig.3 Distribution of ebb current field

① Ecomsed 模式说明书

4 虎门小尺度动力结构及鳧洲水道对其的影响

图 4 为涨、落急时虎门局部流场图。从图中可以看到,落急时虎门口流速很大,最大二维平均流速达 1.78 m/s , 加上蕉门鳧洲水道的流动从西侧的冲击,形成了一股沿虎门口东边穿鼻水道的急速射流,并在鸡抱沙附近形成一低速区。图中射流在距虎门一段距离后突然折断,是由挖沙深坑紧接拦门沙所产生的水下地形突变造成的。涨急时从伶仃洋涌来的潮流挟带着蕉门鳧洲水道下泄水体一起通过虎门,形成反向射流,最大二维平均流速在 1 m/s 以上。

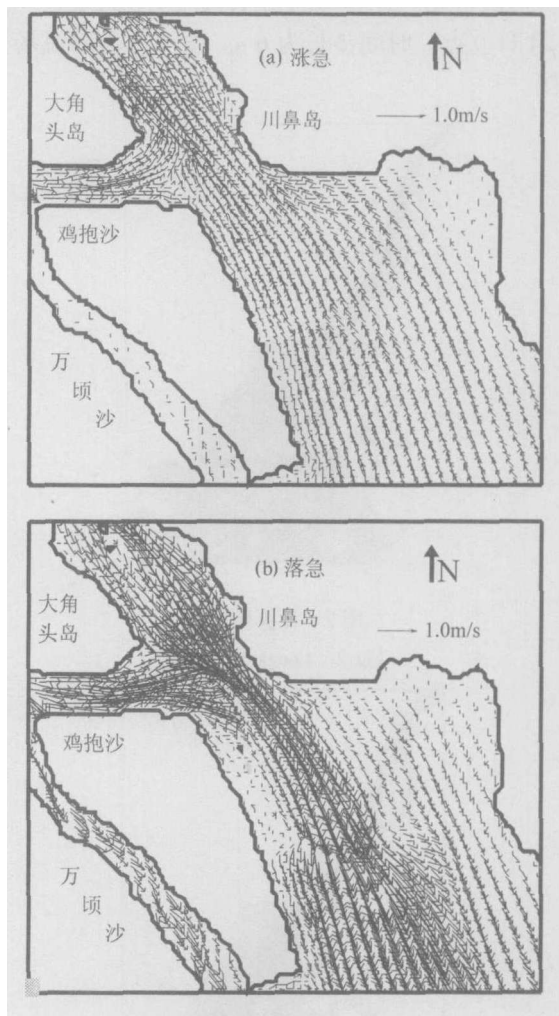


图 4 虎门局部流场图 - 涨急和落急

Fig.4 Local current of Humen Estuary (Ebb quickness and Flood quickness)

由于‘门’的存在,造成虎门河口的双向射流。虎门双向射流系统的形成在地形上是由于狭窄的峡口和上、下游较大的放宽率造成的。由于上、下游狮子洋与伶仃洋的放宽率与纳潮量差异较大,

两个方向的射流作用是不对称的,它较一般自由表面重力射流更复杂。在河口地区,宽深比较大,射流一般是平面二维的。在射流区,雷诺数远大于临界值 (3000),表明射流是紊动的^[6-9]。落潮时,密度较小的落潮流注入盐度较大的伶仃洋,形成了平面、紊动、浮力射流;又虎门向南的放宽率大于射流角 (约 12.5°),所以接近自由射流,并满足平面射流轴向流速分布的自保性 (相似性)。涨潮时,狮子洋有很大的纳潮量,但河道较窄,放宽率接近射流角,受侧边界作用影响较大,形成平面、紊动、附壁、特殊的浮力射流^②。

鸡抱沙的围垦使蕉门鳧洲水道自西向东汇入伶仃洋,与虎门外的落潮动力轴呈钝角相交,由于蕉门水系“以支夺干”的现象使得在动力结构上虎门变得复杂。落潮时,鳧洲水道下泻的径流先在穿鼻水道西侧向东南流,然后转南,最后折向西南,呈弧形流路汇入伶仃水道,鸡抱沙东北岸段便成为凸岸淤积区,发育水下浅滩;鳧洲水道的落潮水量汇入虎门潮汐通道体系后,使穿鼻水道的落潮量加大和动力轴东移,相应穿鼻水道的深槽地形断面亦趋于向窄深方向发展且深泓位置东迁^[10]。

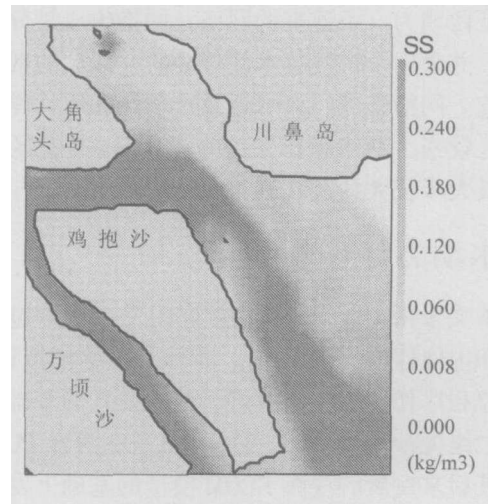


图 5 虎门局部落急泥沙分布

Fig.5 Distribution of suspended sands of Humen ebb quickness

图 5 给出了虎门局部的二维泥沙在落潮时的分布。几个口门的泥沙边界由 1999 年 7 月的实测资料给出。不难看出,蕉门水道的泥沙浓度较高,而虎门上游的较低,西北江带来的大量泥沙主要通过鳧洲水道直接输入到伶仃洋,绕过鸡抱沙向东南呈舌状注入伶仃洋,其分布趋势与准同步 (1997 年洪季落急) TM 卫星影像提取的表层悬浮泥沙空间

② 吴超羽,任杰,包芸等. 珠江河口‘门’的地貌动力学初探 [J]. 中国科学 (待刊)

分布规律十分相似(图6)③。



图6 准同步的卫星图落急悬浮泥沙分布

Fig.6 Approximate synchronous suspended sand distribution of TM ebb quickness image

蕉门鳊洲水道西侧注入虎门射流体,更增加了动力结构的复杂性:逼迫虎门口的射流体轴心东移,改变了虎门口射流体的形状;加上鸡抱沙等侧边界和底边界的边壁制约,加大了双向射流的不对称性;在蕉门口围垦前,存在鸡抱沙、龙穴和仔沙三滩和滩间三槽,在最近的二十多年间,大量围垦使三滩成陆,使得龙穴深槽不复存在,鳊洲水道长期处于冲刷、扩宽的发展阶段,蕉门口绝大部分水沙由它输入伶仃洋喇叭瓶颈口,对伶仃洋进出虎门口涨落潮流形成直接顶冲,对虎门口一带的稳定造成极其不利的影响;同时加强了虎门动力和射流体的冲刷能力,减轻了伶仃洋西滩的淤积压力^[11]。

由上可见,近期的人类活动,大大改变了蕉门水道自然发展的趋势,从而造成鳊洲水道对虎门动力、沉积地貌体系的很大影响,对当前珠江河口的开发、整治工作提出了一个严峻的科学问题,有待于进一步的野外观测和理论研究分析。

5 结 论

(1) 用 Ecomsed 模式对黄埔—内伶仃区域进行了计算研究,采用曲线网格重点对于虎门小尺度动力结构二维流场进行了初步分析,得到较好的模拟效果。

(2) 虎门通过狭窄的基岩峡口流入河口湾,上游的狮子洋与下游的伶仃洋面积宽阔,具有巨大的纳潮量,造就了虎门强大的涨、落潮双向射流体

系。Ecomsed 模式的模拟结果较细致地反映出虎门的双向射流体系,为我们进一步深入研究提供了有利工具。

(3) 泥沙在落潮时,通过鳊洲水道高浓度的悬浮泥沙绕过鸡抱沙向东南呈舌状注入伶仃洋,其分布趋势与准同步(1997年洪季落急)TM卫星影像提取的表层悬浮泥沙空间分布规律十分相似。

(4) 鳊洲水道的西侧注入射流体,严重影响着虎门的动力、沉积系统。对于虎门口的小尺度动力结构、双向射流体系及泥沙分布、沉积等问题有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] WU C Y, BAO Y, REN J, et al. A study on the Pearl River Delta in the Last 6000 Years, - A long-term modeling approach[C]. International Conference on Tidal Dynamics and Environment (TIDALITE 2002), Oct.8 - 13, 2002, Hangzhou, China.
- [2] WU C Y. Evolution and long-term morpho-dynamic response in a special type of estuary[J]. Sciences in China (B), 2001, 44(S): 112 - 125.
- [3] 余常昭. 紊动射流[M]. 高等教育出版社, 北京, 1993: 4.
- [4] 余常昭. 环境流体力学导论[M]. 清华大学出版社, 1998: 1.
- [5] 包芸, 周水华, 胡如根. 伶仃洋曲线网格生成及在虎门水动力数值模拟中的应用[J]. 暨南大学学报, 2005, 26(1): 1 - 4.
- [6] BROWN J, HILL A E, FERLAND L, et al. Observations of a seasonal jet-like circulation at the central North Sea cold pool margin. Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 1999, 48: 343 - 355.
- [7] CHAO S Y. River-forced estuaries plumes[J]. Phys Oceanogr, 1988, 18: 72 - 88.
- [8] HORSBURGH K J, HILL A E, BROWN J. A summer jet in St George's channel of the Irish Sea[J]. Estuarine, Coastal, and Shelf Science, 1998, 47: 285 - 294.
- [9] INGRAM R G. Characteristics of the Great Whale River plume[J]. Geophys Res, 1981, 86: 2017 - 2033.
- [10] 王世俊, 李春初, 田向平. 蕉门口发育演变及其对南沙港的影响[J]. 泥沙研究, 2004, 6: 59 - 63.
- [11] 唐兆民. 珠江口虎门“门”的动力学研究[D]. 广州: 中山大学, 2005.

③ 珠江水利委员会科学研究所. 珠江河口滩涂资源调查与演变分析遥感专题研究报告, 2005.

Small-scale Structure of Humen Estuary of the Pearl River and Numerical Model of the Impact from Fuzhou Channel

TANG Zhao-min¹, BAO Yun^{1,2}, REN Jie¹, WU Chao-yu¹

(1. Research Center of Coastal Ocean Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The small-scale structure of Humen estuary of the Pearl River was dynamically analyzed by using ecosmed model and curvilinear grid technology. The results show that there is bi-orientation asymmetry jet system in the upriver and downriver of the Humen estuary. During ebbing, high concentration suspended sands pass through the Fuzhou channel and injects a tongue-like plume into the Lingding ocean bypass Jibaosha. The effluent injected from the western part of the Fuzhou channel makes a notable impact on dynamic and depositional system of the Humen estuary.

Key words: Ecosmed model; Humen; Fuzhou channel

· 简 讯 ·

中山大学获国家自然科学基金资助再创新高

2005 年度国家自然科学基金项目评审结果日前公布, 中山大学获国家自然科学基金资助项目总数为 183 项, 资助经费超过 5600 万元, 面上资助项目及金额都再创历史新高, 居全国第七位。与中山大学历史最好成绩 2004 年的资助项目总数 136 项、资助总金额 3070.5 万元相比, 分别增长 34.6% 和 82.5%。今年获资助的 183 个项目中, 其中面上项目 169 项, 资助金额为 4304.1 万元; 重点项目 4 项, 资助金额 480 万元; 国家杰出青年基金获得者 7 人, 资助金额 700 万元; 海外、港澳联合资助基金 3 项, 资助金额 120 万元。

今年中山大学理工科获国家基金资助项目有较大突破, 从各单位获资助情况来看, 数计学院、信息学院、化学与化工学院居前三位, 获准率较高。

(张 讯)