维普资讯 http://www.cqvip.com

海州湾及邻近海域潮流数值计算

孙长青[1]　郭耀同[1]　赵可胜[1]　陈斌林[2]

([1] 中国海洋大学环境科学与工程学院 青岛 266003)
([2] 连云港市环保局 连云港 222001)

提要　采用不规则三角形网格的分步杂交法，建立海州湾及邻近海域二维变边界潮流数值模型，计算得到最大潮流分布、同潮时线与等振幅线、潮流椭圆、潮致欧拉余流分布及不同时刻潮流场分布。

关键词　海州湾，邻近海域，潮流，数值计算
中图分类号　P731.2；P752　**文献标识码**　A　**文章编号**　1000-3096(2003)10-0054-05

随着计算机科学的发展，使得国内外越来越多的海洋科学工作者可以方便地利用数值计算的方法来研究海洋。由于数值计算方法较之物理模拟有着周期短、费用低等明显优势，因此，在解决诸如海岸工程中涉及泥沙运动、污染物扩散等问题时，大都采用数值计算方法。

1　计算方法

本文采用不规则三角形网格的分步杂交方法[1]，建立海州湾及邻近海域二维变边界潮流数值模型，计算海域见图1。

1.1　流体动力学方程

选用一个固着于"f-平面"上的直角坐标系(XOY 平面)和静止海面重合，组成右手坐标系，Z 轴向上为正，于是描写正压海洋深度平均的运动方程组为：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}+\frac{\partial (Hu)}{\partial x}+\frac{\partial (Hv)}{\partial y}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-g\frac{\partial \zeta}{\partial x}+fv-\frac{g\sqrt{u^2+v^2}}{C^2H}u+\frac{\tau_x}{\rho H}+\varepsilon\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-g\frac{\partial \zeta}{\partial y}-fu-\frac{g\sqrt{u^2+v^2}}{C^2H}v+\frac{\tau_y}{\rho H}+\varepsilon\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{3}$$

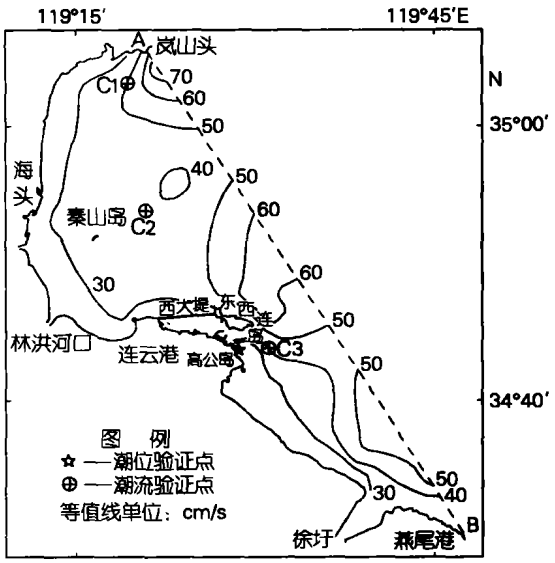

图1　计算域及最大流分布

Fig.1　Computed area and distribution of maximum current speed

第一作者：孙长青，出生于1957年，高级工程师，主要从事海洋环境及海洋环境影响评价等领域的研究工作。电话：0532-2032983，E-mail：sunty@ouc.edu.cn

收稿日期：2003-01-22；修回日期：2003-05-15

维普资讯 http://www.cqvip.com

式中：u，v 分别为对应于 x，y 轴的深度平均流速分量；t 为时间坐标；f 为柯氏参数（$f=2\Omega\sin\varphi$，Ω 为地转角速度，φ 为地理纬度）；g 为重力加速度；$H=h+\zeta$（h 和 ζ 分别为自平均海面起算的水深和水位高度）；τ_x，τ_y 分别为对应于 x，y 方向水面上的风应力（$\tau_x=r^2w^2\cos\theta$，$\tau_y=r^2w^2\sin\theta$；r^2 为风应力系数，其值约为 0.0026，w 为风速，θ 为风向角）；ρ 为海水密度；ϵ 为水平涡动粘滞系数；$C=4.64/nH^{1/6}$ 为 Chezy 系数（$cm^{1/2}/s$），n 为表示海底粗糙度的 Manning 系数。

方程的定解条件为：

初始条件：$t=0$ 时，$u=u_0$，$v=v_0$，$\zeta=\zeta_0$

边界条件：

在开边界（水－水边界）：$\zeta=\zeta'$

在陆边界（水－陆边界）：$\vec{v}\cdot\vec{n}=0$（沿岸移动，$\vec{n}$ 为边界法线方向）

由方程(1)～(3)及定解条件构成了完整的二维浅海潮波的闭合定解方程组。

在实际计算中，由于浅海较强的湍耗散作用，总是取零值为初始条件，而且任何初始能量经过一定时间后总要耗散掉，故当计算达到一定时间长度后，初始效应总会消失，而只是由 ζ' 这一谐振潮的唯一强迫函数在起作用，显然对于 ζ' 的取值，要求具有满意的精度。

1.2 分步杂交方法

此方法是将方程(2)和(3)分为两步求解；

在前半步长，$n\triangle t<t\leqslant(n+\frac{1}{2})\triangle t$ 时，用特征线方法求解方程：

$$\frac{1}{2}\frac{\partial u^{(1)}}{\partial t}+u^{(1)}\frac{\partial u^{(1)}}{\partial x}+v^{(1)}\frac{\partial u^{(1)}}{\partial y}=0 \tag{4}$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial v^{(1)}}{\partial t}+u^{(1)}\frac{\partial v^{(1)}}{\partial x}+v^{(1)}\frac{\partial v^{(1)}}{\partial y}=0 \tag{5}$$

在后半步长，$(n+\frac{1}{2})\triangle t<t\leqslant(n+1)\triangle t$ 时，用集中质量有限元方法求解方程：

$$\frac{1}{2}\frac{\partial u^{(2)}}{\partial t}=-g\frac{\partial\zeta}{\partial x}+fv^{(2)}-\frac{g}{C^2}\frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H}u^{(2)}+\frac{\tau_x}{\rho H}+\epsilon\left(\frac{\partial u^{(2)}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2u^{(2)}}{\partial y^2}\right) \tag{6}$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial v^{(2)}}{\partial t}=-g\frac{\partial\zeta}{\partial x}+fu^{(2)}-\frac{g}{C^2}\frac{\sqrt{u^2+v^2}}{H}v^{(2)}+\frac{\tau_y}{\rho H}+\epsilon\left(\frac{\partial v^{(2)}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2v^{(2)}}{\partial y^2}\right) \tag{7}$$

1.3 连续方程

对连续方程(1)，则在一个整时间步长中采用与 (u,v) 时间交错的有限体积守恒格式。

1.4 计算域、网格设置及水界强迫函数[2]

取岚山头至燕尾港一线为开边界，包括海州湾及东西连岛南部海域为计算域（见图 1），计算域内共有 829 个结点，1 410 个单元，最小网格步长 123.5 m。计算时间步长 $\triangle t=2.588$ s，一个潮周期内运行 17 280 步。由于计算海域潮汐性质为正规半日潮且只研究潮波运动，故本文只考虑半日潮且不考虑海面边界条件的风应力。

水界强迫函数按 $\zeta(t)=(H_{M_2}+H_{S_2})\cos(\sigma_{M_2}t-g_{M_2})$ 输入

式中：t 为时间，H_{M_2}，H_{S_2} 分别为 M_2，S_2 分潮调和常数振幅；σ_{M_2}、g_{M_2} 分别为 M_2 分潮角速度及潮汐调和常数位相；$\zeta(t)$ 表示平均大潮状况下的水位值。

1990 年 11 月 2 日至 9 日在山东的岚山港（岚山头）、江苏的燕尾港进行 7 昼夜的潮位观测，并用连云港常年验潮站同年 11 月份资料进行订正。验潮期间的 11 月 2 日至 3 日进行 3 个潮流站的潮流同步观测。经调和分析所得调和常数作为水界输入及潮位、潮流实测资料对计算结果做验证。

2 计算结果

2.1 潮位、潮流验证

以连云港验潮站（位置见图 1）的潮位实测资料来验证潮位计算的正确性，由图 2 的潮位验证曲线可看出，高潮时计算潮位与实测潮位相差 5 cm 左右，潮时重合。

3 个潮流实测位置见图 1 中的 C1，C2 和 C3 点。图 3 为潮流验证玫瑰图，计算域北部的 C1 点基本为往复流性质，C1，C3 点为旋转流性质，3 个点潮流均为逆时针向旋转。计算值与实测值比较，主流大小的相对误差不超过 6%。主流向相差不超过 10°。以上验证结果说明，本数值计算是成功的。

2.2 最大流速分布

图 1 中等值线为计算所得最大流速分布，以 50 cm/s 流速等值线可将强流区分为 3 个组团，即北组团、中组团和南组团。北组团流速最大，发生在岚山头以南海区，流速可达 70 cm/s 以上；中组团次之，最

维普资讯 http://www.cqvip.com

大流速大于 60 cm/s，小于 70 cm/s；南组团最小，流速小于 60 cm/s。除沿岸以外的其他海域流速一般在 30～40 cm/s 左右。

2.3 同潮时线和等振幅线

图 4 为计算同潮时线和等振幅线，实线为同潮时线，虚线为等振幅线。计算表明：潮波由北向南传播，属于中国黄海反时针潮波系统，岚山头与燕尾港同潮时线差 20°以上，即岚山头半日分潮发生高潮的时间比燕尾港早 40 min。

等振幅线的特征为由东向西逐渐增大，最东端的燕尾港只有 180 cm 左右，到西端的海头附近增至 210 cm 左右，两者相差 30 cm 左右。

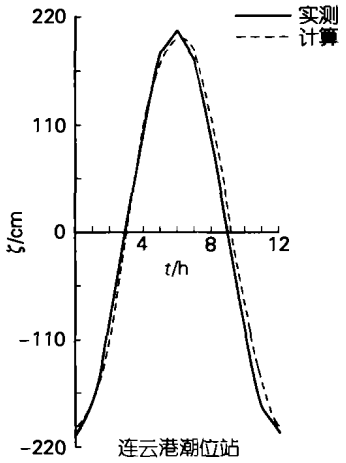

图 2 潮位验证曲线

Fig. 2 Observed and computed tidal curves

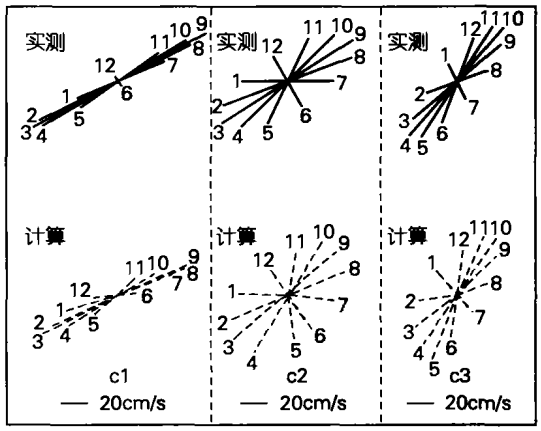

图 3 潮流验证玫瑰图

Fig. 3 Observed and computed roses of tidal current

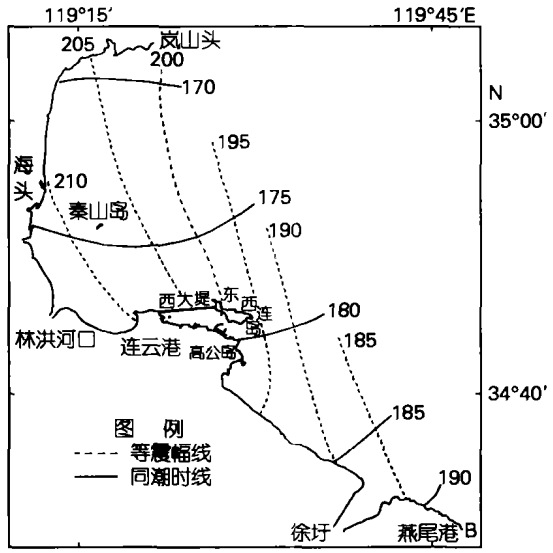

图 4 同潮时线和等振幅线

Fig. 4 Dotidal chart and iso-amplitude curves

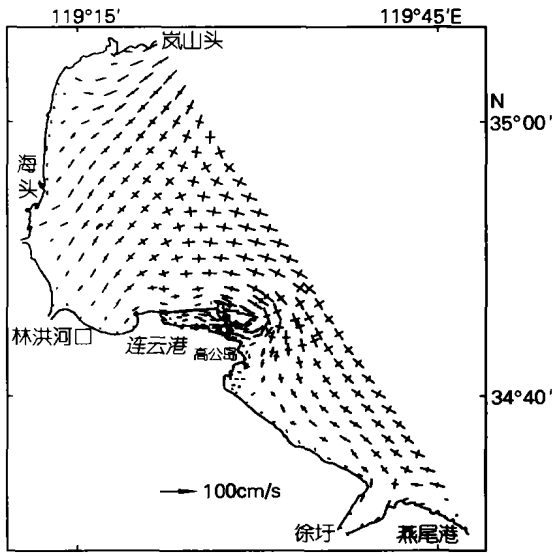

图 5 潮流椭圆分布

Fig. 5 Distribution of tidal current ellipses

维普资讯 http://www.com

2.4 潮流椭圆

潮流椭圆长轴方向表示最大流方向，长半轴长度表示最大流量值，短轴方向表示最小流方向，短半轴长度表示最小流量值。潮流椭圆分布见图5，计算域北部区域、东西连岛周围、连云港港区内及沿岸区域为往复流，离岸较远区域均为旋转流，旋转方向为逆时针方向。

2.5 计算潮致欧拉余流

潮致欧拉余流速度是指海域内某一确定点一个潮周期内潮流速度的时间平均值，表示在确定位置上流体周期平均的迁移趋势。图6为计算潮致欧拉余流分布，计算域中大部分余流方向为东南向，沿岸区域流速较强，一般在5～7 cm/s左右，东西连岛北部余流普遍小于南部。在连岛西北有一逆时针流涡，距岛10 km左右；在连岛东南有一顺时针流涡，距岛约3 km。

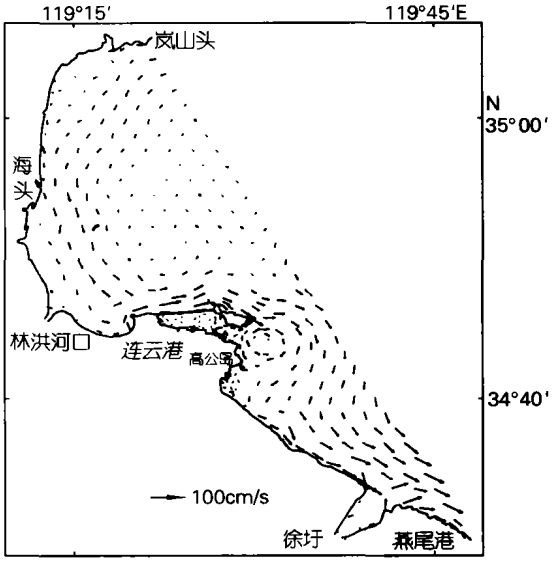

图6 计算欧拉余流场

Fig.6 Computed eulerian residual current

2.6 计算潮流场

为体现变边界数值计算的效果，给出连云港为参考港的高潮时(图7)和低潮时(图8)流场分布。在高潮时计算域内大部分海域的海水由西北流向东南，只有北部部分区域由东北流向西南，此时临洪河口附近约6 km宽的滩涂充满海水。在低潮时，整个流场结构同高潮时，只是流向相反，滩涂基本退出。高潮时流速略大于低潮时，大部分海域流速在50～60 cm/s。

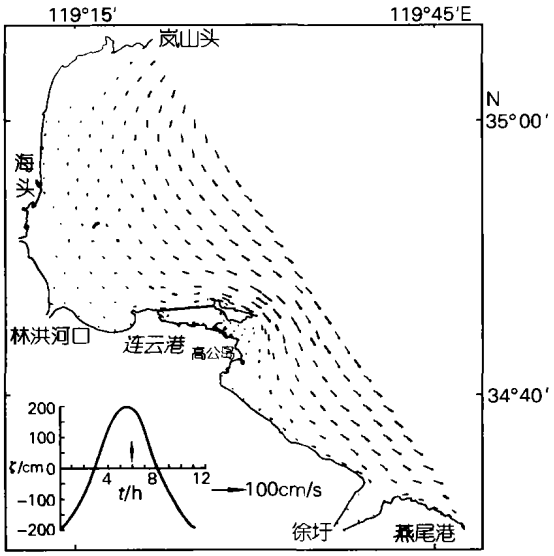

图7 计算高潮时潮流场

Fig.7 Computed tidal current field at high water

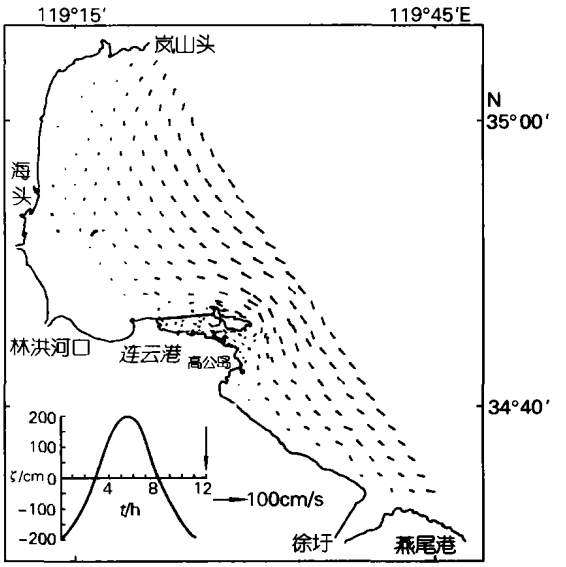

图8 计算低潮时潮流场

Fig.8 Computed tidal current field at low water

维普资讯 http://www.c[redacted]om

3 结语

海州湾及邻近海域属于中国黄海反时针潮波系统，岚山头与燕尾港潮时相差约 40 min。计算域东端与西端振幅相差 30 cm 左右。最大流发生在岚山头以南海域，流速可达 70 cm/s 以上。沿岸及岚山头以南海域为往复流，其它海域为旋转流，旋转方向为逆时针。东西连岛西北有一逆时针的欧拉余流流涡，距岛 10 km 左右；连岛东南有一顺时针流涡，距岛约 3 km。高潮时海水可淹没整个滩涂，大部分海域流速在 50～60 cm/s。

参考文献

1 吴江航. 计算流体力学的理论、方法及应用. 北京：科学出版社，1988.

2 王学昌，娄安刚，孟伟，等. 大鹏湾潮流数值计算. 海洋科学，2001，25(12)：37-40

NUMERICAL COMPUTATION OF TIDAL CURRENT FOR HAIZHOU BAY AND NEAR SEA AREA

SUN Chang-Qing[1] GUO Yao-Tong[1] ZHAO Ke-Sheng[1] CHEN Bin-Lin[2]

([1]*Ocean University of China, Environment Science and Engineering College, Qingdao*, 266003)

([2]*Environmental Protection Bureau of Lianyungang City, Lianyungang*, 222001)

Received: Jan., 22, 2003

Key Words: Haizhou Bay, Near the sea area, Tidal current, Numerical computation

Abstract

Using the split steps finite element method, the varied-boundary two-dimensional numerical model of the tidal current in the Haizhou Bay and near its area is constructed. The tidal current at different times and the eulerian residual current are calculated, also the distribution of maximum tidal current speed, the cotidal line, the iso-amplitude curves and that of tidal current ellipses are given in this paper. (本文编辑：刘珊珊)

欢迎订阅《海洋科学》 欢迎广告惠顾

《海洋科学》是由中国科学院海洋研究所主办、科学出版社出版的学术性和技术性期刊，中国自然科学核心期刊、华东地区优秀期刊、山东省优秀期刊。本刊以密切联系生产实际、服务于我国现代化建设为宗旨，及时、快速报道海洋学及其分支学科的新成果、新理论、新观点、新工艺及新进展等，对重大科研和应用性研究成果特别予以优先报道。主要刊载内容有：海洋生物、海洋水产生产、海洋活性物质提取、海洋环境保护、海洋物理、物理海洋、海洋地质、海洋化学、海洋工程、海洋仪器研制等方面的学术论文、研究报告、研究简报、专题综述、学术讨论和争鸣、学术动态以及新产品介绍(有偿刊登)等文章。

据中国科技信息研究所最新统计，《海洋科学》影响因子为 0.385，在我国同类科技期刊中名列前茅。

本刊为月刊，每月 9 日出版，16 开本 80 页，每期定价 15 元，全年订价 180.00 元。本刊国内外公开发行(国际刊号：ISSN1000-3096；国内刊号：CN37-1151/P；国内邮发代号：2-655；国外发行代号：BM6666)。全国各地邮局均可订阅。欢迎各科研机构、高等院校、生产厂家和从事该领域的科技人员踊跃订阅。邮局订阅不便者可直接向本刊编辑部订购。本刊发行量在同类期刊中一直名列前茅，订户遍及全国 20 多个省、市、自治区，影响面广，宣传力大，欢迎广大的广告客户在本刊刊登广告，价格优惠。

《海洋科学》编辑部地址：青岛南海路 7 号，266071；电话及传真：(0532)2898755；E-mail：MSJ@ms.qdio.ac.cn