第25卷 第6期 海 洋 与 湖 沼 Vol. 25, No. 6
1994年11月 OCEANOLOGIA ET LIMNOLOGIA SINICA Nov., 1994

研究简报

极浅海域潮流数值模型*

张存智 杨连武 窦振兴
(国家海洋局海洋环境保护研究所，大连 116023)

提要 通过对以往的浅水环流数值模型进行改进，建立适用于极浅水域的且能达到较高分辨率的潮汐环流数值模型。模型的主要特点是：(1) 通过改进海底摩擦项的表达式来克服传统的二次方律在极浅的潮滩区所产生的不稳定问题；(2) 采用逆风格式处理动量方程中的平流项，有效地抑制由于岸边界移动引起的数值短波的扩散。结合老虎滩湾海上工程的需要，利用本模型进行一系列的数值模拟试验。经过实测资料验证表明，改进后的模型具有良好的稳定性和重现性。

关键词 极浅海域 潮流 数值模型

海洋环境及海岸工程等方面的研究，经常涉及到近岸极浅海域流场数值计算问题。在这类海区(水深一般在 0—5m 的范围)，潮差与水深相当，陆-水边界随潮移动，往往遇到数值模型的稳定性问题。不少学者曾针对解决这一问题建立了各种数值模型。处理这种问题的主要困难在于：在极浅水域，平流项、底摩擦项显得相对重要，这些项都是非线性项；潮滩陆水边界线的移动会产生数值短波干扰，影响计算精度，甚至会导致数模计算失败。本文通过引入逆风格式处理平流项，并通过改进海底摩擦项的表达式来克服可能由于底摩擦项所产生的稳定性问题，以期为极浅海域建立具有良好的稳定性和重现性的潮汐环流数值模型。

1 极浅水域中底摩擦项的特殊处理

在潮差与深度同量级这类极浅的潮滩水域中，影响数值模型的稳定性的一个极重要的因素是海底摩擦项。大量的数值试验表明，在运动方程中所采用的底摩擦公式(Leendertse et al., 1971) 在水深大于 10m 时模拟结果较好，而在实际深度为 3—4m 时，数值格式的稳定性难于处理。Ramming 等(1980)曾证明了在非常浅的海域(比如当总深度值在 0.1m 左右时)，容易导致数值模型的不稳定性。因此，潮滩动边界模型中的底摩擦项应加以适当修正，使其在任何水深情况下保持良好的稳定性。本研究的做法是，通过引进下述表达式来修正底摩擦项

$$\frac{\tau_b}{H} = C_D \frac{\|V\| V}{H + H_1 e^{-pH}} \tag{1}$$

其中，摩擦系数 $C_D = g/c^2$，$c = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$；$H = h + \zeta$，$n$ 为 Manning 系数。参数 H_1 是一个具有深度量纲的参数，数值试验表明，取 $H_1 = 1\text{m}$，效果较好。指数参数 p 的取值

* 大连市政府委托项目。
收稿日期：1992年7月11日，接受日期：1993年2月20日。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnk

范围为 0.5,1,2,…,10，通常取 $p=1$。本研究的数值计算结果表明，新的底摩擦表达式可以取得较好的计算效果，没有遇到不稳定的问题。

2 逆风格式的引进

引进逆风格式旨在提高数值稳定性。运动方程中的平流项 $U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}$ 和 $U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}$ 是非线性项，在开阔的深水区域，它的作用较小，但在近岸浅水区域，由于速度分布的空间梯度较大，地形变化复杂，致使各种动力影响因素之间的相互作用强化，平流项的作用便相对重要。由于平流项的非线性性质，也会导致在边界上产生的短波干扰的传播，从而影响计算模型的稳定性。因此须采用适当的差分格式来处理运动方程中的平流项，或采用简单逆风格式，或采取欧拉-拉格朗日方法。本文的离散格式采用简单逆风格式。

令 $adv_u=U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}$; $adv_v=U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}$

对其构成逆风格式，则有

$$(adv_u)_{i,j}=\frac{\Delta t}{2\Delta x}U_{i,j}(\alpha_x^u u_{i,j-1}+\beta_x^u u_{i,j}+\gamma_x^u u_{i,j+1})$$

$$+\frac{\Delta t}{2\Delta y}\bar{V}_{i,j}(\alpha_y^u u_{i-1,j}+\beta_y^u u_{i,j}+\gamma_y^u u_{i+1,j}) \tag{2}$$

式中，α,β,γ 为权系数，值为:

当 $U_{i,j}\geqslant 0$ 时，$\alpha_x^u=-1$，$\beta_x^u=1$，$\gamma_x^u=0$

当 $U_{i,j}<0$ 时，$\alpha_x^u=0$，$\beta_x^u=-1$，$\gamma_x^u=1$

当 $\bar{V}_{i,j}\geqslant 0$ 时，$\alpha_y^u=-1$，$\beta_y^u=1$，$\gamma_y^u=0$

当 $\bar{V}_{i,j}<0$ 时，$\alpha_y^u=0$，$\beta_y^u=-1$，$\gamma_y^u=1$

式中，$\bar{V}_{i,j}=\frac{1}{4}(V_{i,j}+V_{i,j-1}+V_{i+1,j}+V_{i+1,j-1})$。类似地，有

$$(adv_v)_{i,j}=\frac{\Delta t}{2\Delta x}\bar{U}_{i,j}(\alpha_x^v V_{i,j-1}+\beta_x^v V_{i,j}+\gamma_x^v V_{i,j+1})$$

$$+\frac{\Delta t}{2\Delta y}V_{i,j}(\alpha_y^v V_{i-1,j}+\beta_y^v V_{i,j}+\gamma_y^v V_{i+1,j}) \tag{3}$$

3 基本方程和差分格式

深度平均二维化浅水潮波方程

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t}+\frac{\partial(HU)}{\partial x}+\frac{\partial(HV)}{\partial y}=0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}-fV+g\frac{\partial\zeta}{\partial x}+\frac{gU\sqrt{U^2+V^2}}{c^2(H+H_1e^{-\rho H})}=0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+fU+g\frac{\partial\zeta}{\partial y}+\frac{gV\sqrt{U^2+V^2}}{c^2(H+H_1e^{-\rho H})}=0 \tag{6}$$

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnk

式中，U，V 为深度平均的速度分量（m/s）；ζ 为自由面高度（m）；H 为总深度（$=h+\zeta$）(m)，h 为平均深度（m）；f 为科氏参数（s）；g 为重力加速度（m/s²）。

方程(4)—(6)的边界条件是，在海岸边界上取垂向海岸的流速为零，在湾口边界，采用水位控制。初始条件为 $\zeta(x,y,t_0)=U(x,y,t_0)=V(x,y,t_0)=0$。

差分运算在交错式矩形网格上进行。网格节点的定义如图 1 所示。

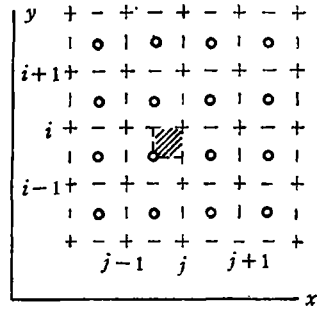

图 1　有限差分网格

Fig. 1　Finite differnce grid

+　水位点；|　V 分量；−U 分量；○ 水深点；阴影线示一组相邻的水位、流速和水深节点使用相同的网格坐标 (i,j)。

按照隐显方向交替差分方法，在对方程(4)—(6)的离散化过程中，将每个时间步长分为前后两个半步长。在前半步长 $\left(t\in\left\{n\Delta t,\left(n+\frac{1}{2}\right)\Delta t\right\}\right)$ 上，沿 x 方向对水位值 ζ 和流速 U 分量作隐式运算，然后显式地计算 V 分量的值。在后半步长 $\left(t\in\left\{\left(n+\frac{1}{2}\right)\Delta t,(n+1)\Delta t\right\}\right)$，沿 y 方向对 ζ 和 V 取隐式运算，然后显式地计算 U 分量的值。

4　动边界处理

潮滩动边界的处理仍采用作者（1990）所使用的方法。即根据潮滩的"淹没"与"干出"过程同潮位变化的相关关系，将陆-水边界线位置描述为与瞬时水深 $D=h+\zeta$ 同步变化的时间函数。当 $D\leqslant 0$ 时，潮滩干出；反之，潮滩被淹没。这样便可以判定某一节点在某瞬时是"干出"的还是"淹没"的。如果在某时刻判定某一节点为干出的，那么就将该节点(水位点)从计算域中去掉，同时，将水位点相邻的流速节点置零。然后利用修改后的新边界线进行下一步长的运算。对于原先干出的节点是否初淹没也需要加以判定，其判定的步骤与"干出"的判定步骤相反。如果判定某(干出的)节点被淹没，则该点重新加入计算域中。为了确保动量方程和连续方程不失掉物理意义，通常选用一个大于零的数值作为判定值 D_0，当 $D\leqslant D_0$ 时，认为节点干出。本计算中取 $D_0=0.1$m。

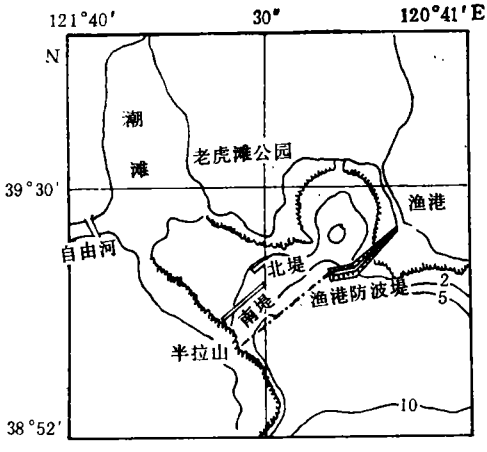

图 2　老虎滩湾顶部地形图

Fig. 2　The topography of the top of Laohutan bight in Dalian City

～海岸线；～～礁石；—·—·—计算边界；～2～等深线(单位 m)。

5　数值试验

为了考查前面建立的潮滩动边界环流模型的适用性，选择大连老虎滩湾进行数值试验。老虎滩湾是半封闭型海湾，湾顶部分为潮滩区，坡度平缓，落潮时出现大面积干滩，是一较典型的潮滩水域。大连市拟在老虎滩湾顶部修建海坝工程，本模型建立后，首先在该项工程的环境可行性论

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk

证中得到应用。

5.1 输入参数　计算范围取老虎滩渔港防波堤至半拉山连线以北的区域(见图 2)。水深，由测深图读取并订正到平均海平面深度。时间步长 $\Delta t = 16s.$，网格间距 $\Delta x = \Delta y = 20m$。科氏参数，$f = 2\omega \sin 39°$。开边界控制水位由老虎滩验潮站提供。

5.2 数值模型验证　为验证计算结果的正确性，将计算结果与 3 个站位的海流观测结果进行了比较，结果列于表 1。不难看出，模拟计算结果与实测资料相当吻合。

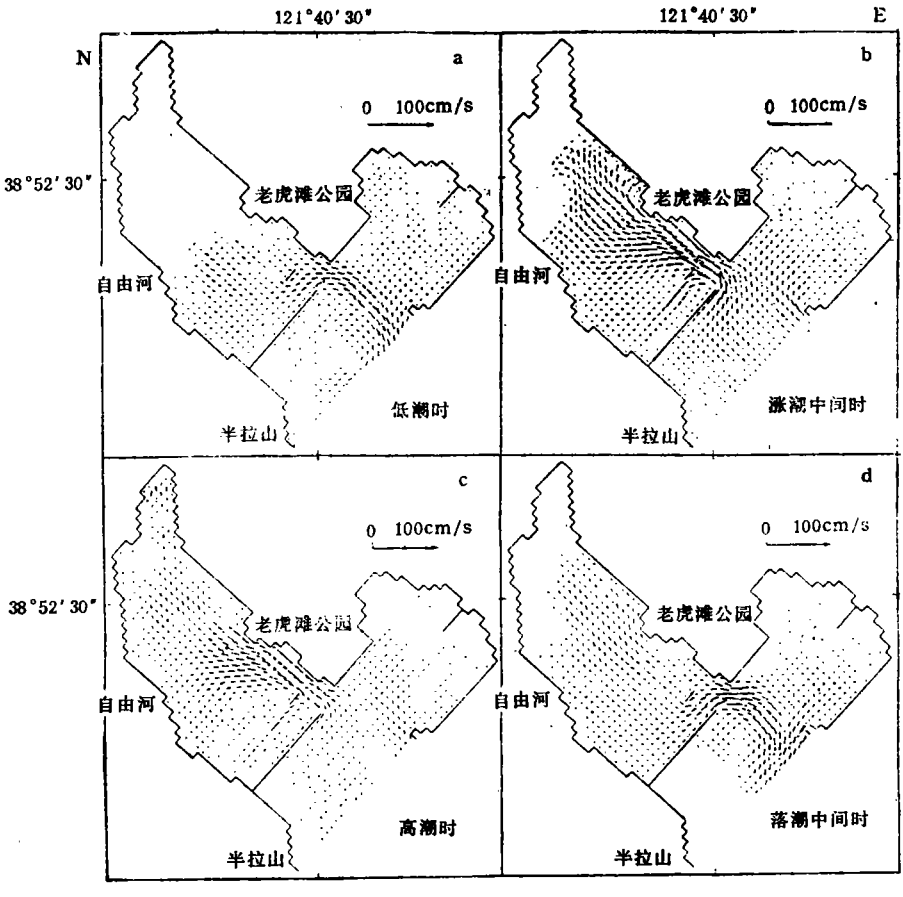

图 3　老虎滩湾顶部流场图

Fig. 3　Tidal current field in the top area of Laohutan Bight in Dalian City

5.3 计算结果分析　计算结果以矢量分布图的形式输出。图 3a—d 分别为低潮时、涨潮中间时、高潮时和落潮中间时 4 个时刻的流场，代表了计算水域内潮流场在一个潮周期内的变化过程。

低潮时，自由河桥以北的大面积潮滩区干出（图 3a），堤内的蓄水面积很小，全域潮流普遍很弱。涨潮期间（图 3b），潮水自开边界流入域内，南堤头狭口处潮流强化，流速可达 40cm/s，沿海湾虎滩公园一侧形成较明显的强流带，干滩逐渐为海水淹没。高潮时(图 3c)，全域为海水淹没，流速介于 10—20cm/s 之间，狭口附近流速可达 30cm/s，强

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnk

表 1　潮流计算值与实测值的比较

Tab. 1　Comparison between the computed and observed of tidal current in Laohutan Bight of Dalian City

站　号	潮　相	流向差(°)	流速差 (cm/s)
C_1	高　潮	7	3
	低　潮	1	0
C_2	高　潮	5	4
	低　潮	7	3
C_3	高　潮	20	3
	低　潮	0	3

流带右侧与南堤之间形成一较弱的反时针涡旋。落潮阶段(图 3d)，潮滩逐渐干出，流速分布比较均匀，一般在 20cm/s 左右。

从整个潮周期看，潮流分布的基本特征是，主流向基本上与湾的轴向一致，强流区见于湾的东侧(虎滩公园一侧)，西部流动较弱。南堤堤根处流动最弱，形成明显的滞流区。这些模拟结果均与实际观测是一致的。

6　结论

老虎滩湾顶部潮流场的数值模拟结果与实际观测是一致的。数值试验表明，本文所建立的数值模型具有良好的稳定性和重现性，适于在极浅的潮滩水域中应用。

参　考　文　献

张存智、杨连武、窦振兴，1990，具有潮滩移动边界的浅海环流有限元模型，海洋学报，12(1)：1—13。

Leendertse, J. J. and Gritton, E. C., 1971, A Water-Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal seas, Vol. II, Computation Procedures, R-708-NYC, pp. 29—33.

Ramming, H. G. and Kowalik, Z., 1980, Numerical modelling of marine hydrodynamics, Elsevier Scientific Publishing Company (Amsterdam, Oxford, New York), pp.232—241.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnk

A NUMERICAL MODEL OF TIDAL CURRENT IN EXTRA-SHALLOW WATERS

Zhang Cunzhi, Yang Lianwu, Dou Zhenxing
(*Institute of Marine Environmental Protection, SOA, Dalian* 116023)

ABSTRACT

A high resolution tidal current numerical model suitable for extrashallow waters was developed by improving the previous numerical model of shallow water circulation. The main points of the improved model are: (1) The expression of the bottom friction terms in the momentum equations are modified in order to overcome the instability resulting from the application of the traditional square law in the extra-shallow tidal flat area. (2) The up-wind scheme is used to deal with the advection terms in the momentum equations, so that the dispersion of the numerical short waves due to the moving of the land-water boundaries is restrained effectively. A finite difference method is used to solve the model equation. The computational grid is staggered. The timestepping procedure is based on the implicit alternate direction approach. The thomas algorithm is used to solve the tridiagonal system. Agreement between the model results and the observed data in numerical modelling experiments carried out in Laohutan Bight indicated that the improved model has good stability and reproducibility.

Key words Extra-shallow waters Tidal current Numerical model

简 讯

《海洋与湖沼》学报历年获奖目录

1988 年	山东省科协优秀科技期刊	一等奖
1990 年	中国科学院优秀自然科学期刊	二等奖
1991 年	山东省科委、山东省新闻出版局、山东省科协优秀科技期刊(总分第一名)	一等奖
1992 年	中国科学院优秀科技期刊	二等奖
1992 年	中国科协优秀科技期刊	一等奖
1992 年	国家科委、中宣部、国家新闻出版总署优秀科技期刊	二等奖
1993 年	华东区优秀科技期刊	一等奖

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnk