

基于 EFDC 模型的盐度数值模拟研究

刘建波¹ 余扬晖¹ 刘洁² 王道儒¹ 陈春华¹ 林国尧¹

(1. 海南省海洋开发规划设计研究院 海口 570125; 2. 海南医学院 海口 571199)

提要 在地形变化剧烈的海域, 由于 σ 坐标在垂向离散出现了较大的压强梯度力误差, 导致盐度模拟误差较大。本文在 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)模型的基础上, 以美国莫比尔湾(Mobile Bay)为例, 比较了在水深变化剧烈的区域 σ 坐标和 LCL σ 坐标下盐度数值模拟结果的差异。研究表明, 采用 LCL σ 坐标能使得压强梯度力所产生的截断误差降到最低; 在 LCL σ 坐标下, 模拟的趋势和模拟数值都能够真实地反应实际的物理情况, 为今后解决此类问题提供了一种新方法。

关键词 LCL σ 坐标, EFDC, 盐度, 压强梯度力

中图分类号 P731

三维流场数值模型在数值模拟领域获得广泛的应用, 它主要模拟水平和垂向的水流运动, 因此坐标尤其是垂向坐标的选取非常重要。三维水流数学模型中大部分采用了地形拟合 σ 垂向坐标, 它能较好地拟合床面地形和自由面, σ 坐标系下的三维流场数值模型在物理海洋学研究中的应用十分广泛, 如国际上流行 POM/ECOM、FVCOM、ELCIRC 等模式。

但是在 σ 坐标系中, 由斜压问题引起的水平压强梯度力的离散近似一直是个长期存在的问题, 其主要困难在于“静压矛盾”, 即在等密度线为水平的情况下, 水平压强梯度力中的两项离散相减时会出现较大误差(孙文心等, 2004)。为了减小这个误差, 诸多学者做了大量的工作。Mellor(1998)在计算压强梯度力时, 提出先扣除全域水平平均密度层结, 这样可以消除由于平均密度产生的误差, 并成功地应用于 POM/ECOM 模型中。Shchepetkin(2003)和 Berntsen(2005)除了采用高阶格式离散外, 分别设计了带权重的密度 Jacobi、压力 Jacobi 法并考虑了动水压强的影响。以上的改进在地形光滑理想的条件下可以提高精度, 而在实际地形的应用中意义不大。

本文以 EFDC 最新开发的三维模型为基础, 根据水深的不同, 在垂向坐标转换时引入一个无量纲参

数(Tetra Tech, 2006)。该参数既能充分利用 σ 坐标的地形拟合优势; 又能满足静压假定, 解决“静压矛盾”, 使压强梯度力误差降低到最小。目前, 国内外正式出版刊物中, 还没有对 LCL σ 坐标和 σ 坐标对比研究的详细报道, 本文以莫比尔湾(Mobile Bay)为例, 分别在 LCL σ 坐标和 σ 坐标下, 首次对比盐度数值模拟结果, 探讨 LCL σ 坐标在解决压强梯度误差时所具有的独特优势, 研究表明这种坐标转换可以广泛应用于地形变化剧烈的海域。

1 LCL σ 坐标

在延续 σ 坐标地形拟合的基础上, LCL σ 坐标(Laterally Constrained Localized Sigma)引入一个无量纲参数, 它能够根据水深的不同设置不同的垂向分层数。根据 Haney(1991)提出的 σ 坐标下海洋模型中关于水平压强梯度力误差的静压假定可知, 此无量纲参数在垂向转换时可以平滑水深相邻网格的变化率, 使得水深突变区域的变化率不发生较大改变, 满足静压假定。因此可以使压强梯度力所产生的截断误差降低到最小, 能够避免垂向离散带来的误差。

1.1 LCL σ 坐标转换

LCL σ 坐标系下, 坐标转换公式为:

* 国家自然科学基金重点项目, 40830850 号。刘建波, E-mail: liujianbo2003@163.com

通讯作者: 刘洁, E-mail: hnliujie2003@163.com

收稿日期: 2011-12-16, 收修改稿日期: 2012-04-19

$$z = z_s - \frac{(z_{sref} - z_{bmin})}{(z_{sref} - z_b)}(z_s - z_b)(1 - z), \quad (1)$$

其中:

Z_{sref} : 原始坐标下的参考自由表面高程;

Z_s : 原始坐标下的自由表面高程;

Z_b : 原始坐标下的底部高程;

Z_{bmin} : 原始坐标下的最小底部高程;

z : 无量纲的垂向坐标(0, 1);

这里 Z_{sref} 是为起到初始化垂向层数的作用。

上式还可以进一步转换为:

$$z = \frac{\lambda(Z_s - Z_b) + Z - Z_s}{\lambda(Z_s - Z_b)} = \frac{\lambda H + Z - Z_s}{\lambda H} \quad (2)$$

其中 $H = Z_s - Z_b$ 是水体的水深。

$$\lambda = \frac{Z_{sref} - Z_{bmin}}{Z_{sref} - Z_b} \quad (3)$$

即为 LCL σ 坐标参数。

明显地, 当 $\lambda = 1$ 时, 即为标准的 σ 坐标。

1.2 初始化垂向分层

LCL σ 坐标在垂向上根据不同水深来分层。常用的分层方法为: 先根据实际水深, 指定一个最大参考高程值, 该值要小于最大水深的高程值; 同时指定垂向分层的最大分层数, 即可对研究区域进行 LCL σ 坐标垂向分层。

LCL σ 坐标变换后基本方程组, 见文献(Tetra Tech, 2006)。

2 模型应用

2.1 莫比尔湾简介

莫比尔湾位于美国阿拉巴马州西南部、墨西哥湾北部, $30^{\circ}13'N-30^{\circ}39'N$, $87^{\circ}45'W-88^{\circ}07'W$ 之间。长约 50km, 呈南北走向, 宽度从北部的 20km 到南部 40km, 平均水深约 3m, 水域面积为 1060km^2 , 海湾中心有一个深度为 12m 的深水航道。水深地形图如图 1 所示。

2.2 模型配置

在 LCL σ 坐标系下, 研究区域在垂向上根据水深的不同进行分层: 最大分层数位于外海, 为 8 层; 莫比尔湾大部分浅水区分为 2—3 层; 在深水航道区域, 垂向分层为 7 层。垂向网格分层和深水航道区域局部分层如图 2 所示。在水平方向上采用正交曲线网格, x 方向最小网格为 42m, 最大网格为 3505m; y 方向最小网格为 83m, 最大网格为 3319m, 水平网格为 1758 个。

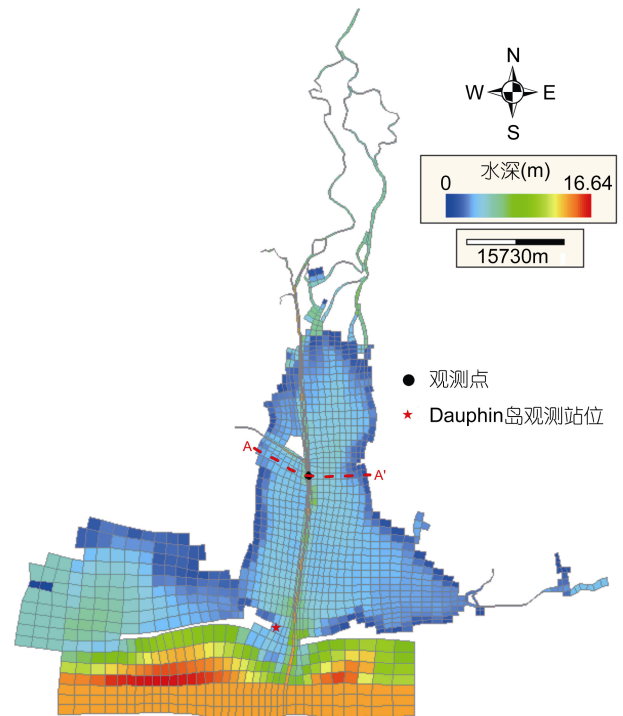


图 1 计算网格和水深等值线图
Fig.1 The computed grids and the depth scale

在 σ 坐标系下, 垂向上统一分为 8 层; 水平方向上也采用采用正交曲线网格, x 方向最小网格 42m, 最大网格为 3505m; y 方向最小网格为 83m, 最大网格为 3319m, 水平网格为 1758 个。

2.3 模型的初始条件、边界条件及模型验证

2.3.1 模型的初始条件、边界条件 模型的南开边界和东开边界的水位条件和温度条件采用 2003 年 1 月 10 日—2005 年 12 月 2 日每小时的观测值; 上游莫比尔河流量条件采用 2003 年 1 月 10 日—2005 年 12 月 2 日每小时的观测值, 温度采用 2003 年 1 月 10 日—2005 年 12 月 2 日逐月的温度平均值。由于莫比尔湾沿岸河流众多, 为了保证模型的精度, 在莫比尔湾沿岸同步设置了 40 余个观测站, 记录了从 2003 年 1 月 10 日到 2005 年 12 月 2 日每天或者一个月的平均流量、温度和盐度, 共同作为边界条件应用到模型中。模型的初始水位为 0m; 各层初始水温均为 10°C ; 初始盐度从外海的 34 逐渐过渡到莫比尔湾顶部的 1.1333, 各层相等, 盐度初始场如图 3 所示, 莫比尔湾的边界网格位置图如图 4 所示。

LCL σ 坐标和 σ 坐标采用相同的初始条件和边界条件, 时间步长均为 10s, 模拟时段为 2003 年 1 月 10 日—2005 年 12 月 2 日。

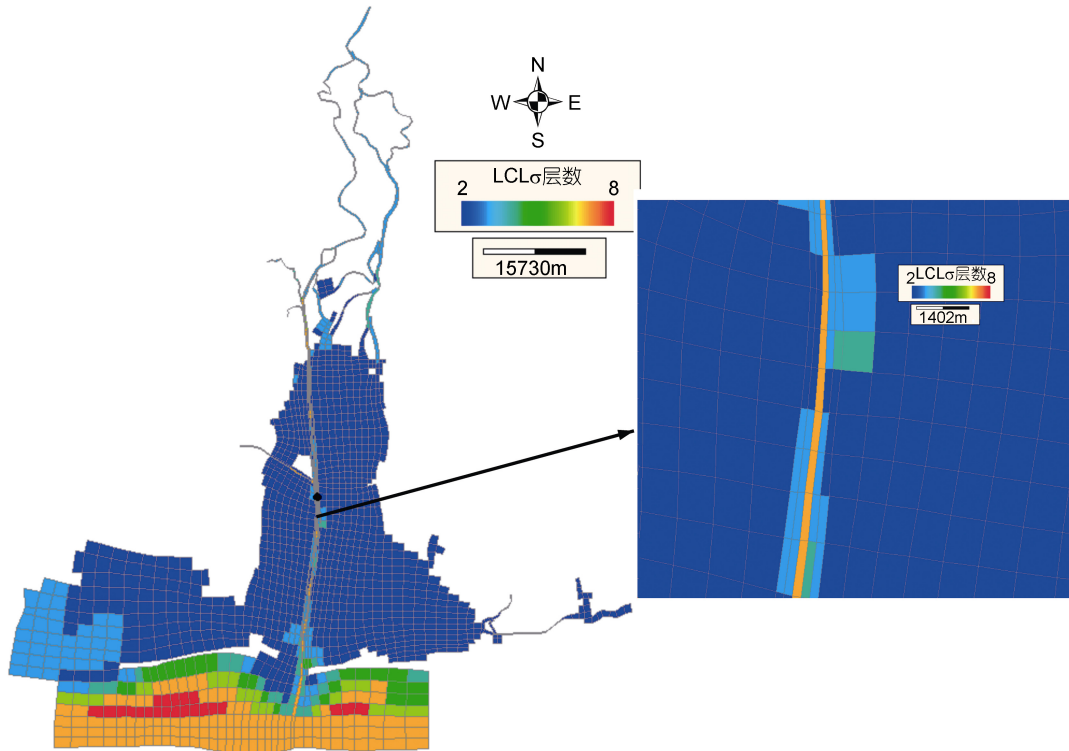


图 2 LCL σ 坐标下垂直分层及深水航道局部垂直分层

Fig.2 The vertical layering of the Mobile Bay and a part of the deepwater channel in the LCL σ coordinates

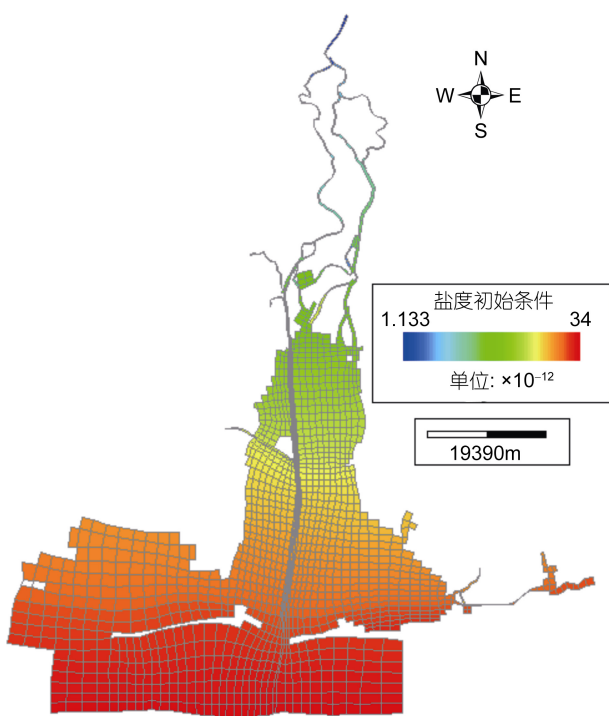


图 3 莫比尔湾盐度初始条件

Fig.3 Initial conditions of salinity in Mobile Bay

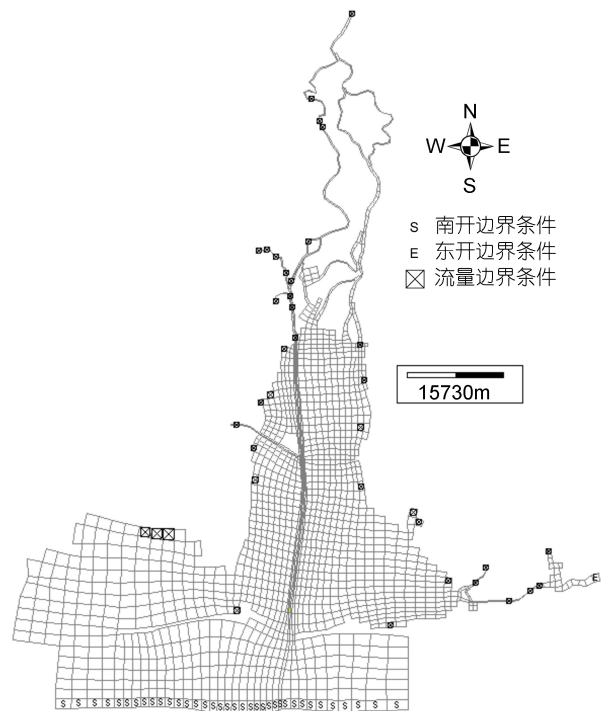


图 4 莫比尔湾边界网格位置图

Fig.4 Boundary grids in Mobile Bay

2.3.2 模型验证 选取 Dauphin 岛观测站 2003 年 7 月 3 日至 2004 年 8 月 31 日逐时观测的盐度值,

采用 LCL σ 坐标模型对其进行验证, 验证点如图 1 所示。

根据图 5 可知, 利用 EFDC 模型所建立的莫比尔湾三维盐度模型, 其模拟结果和观测值基本吻合, 可以作为进一步研究莫比尔湾盐度的数学模型工具。

3 结果分析

观测点在横断面上(A—A', 图 1 所示)网格剖分

和水深示意图如图 6 所示。由此可见, 在观测点附近, 水深从 7m 急剧变化到 14m 左右, 所以此点可作为水深剧烈变化特例, 可用来比较 LCL σ 坐标和 σ 坐标在模拟盐度上的差异。文中特选择 2004 年 5 月 19 日、7 月 20 日的盐度观测值分别与 LCL σ 坐标、 σ 坐标模拟值进行比较分析。

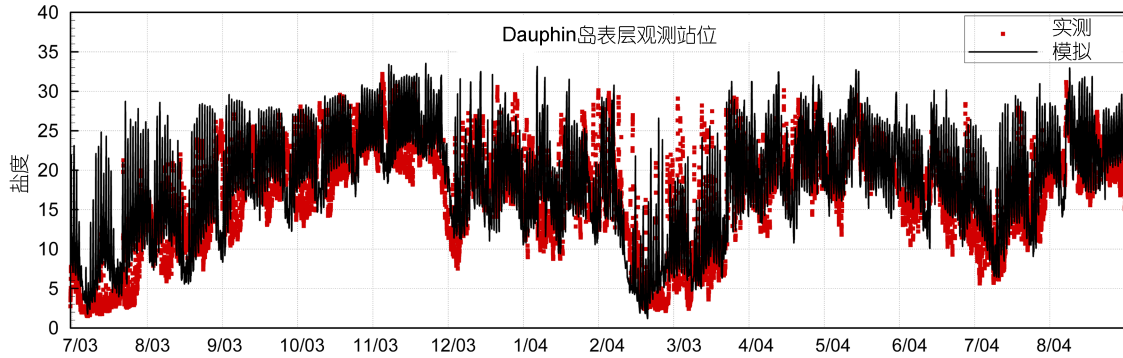


图 5 Dauphin 岛观测站盐度实测值与模拟值比较

Fig.5 Measured and simulated salinity at Dauphin Island station

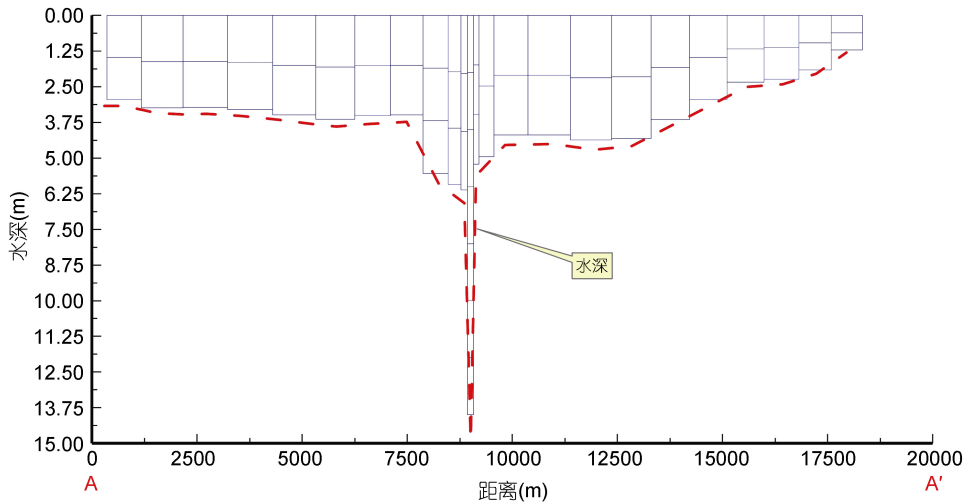


图 6 观测点横断面水深和网格剖分示意图

Fig.6 The depth and the grids of cross section at the observed location

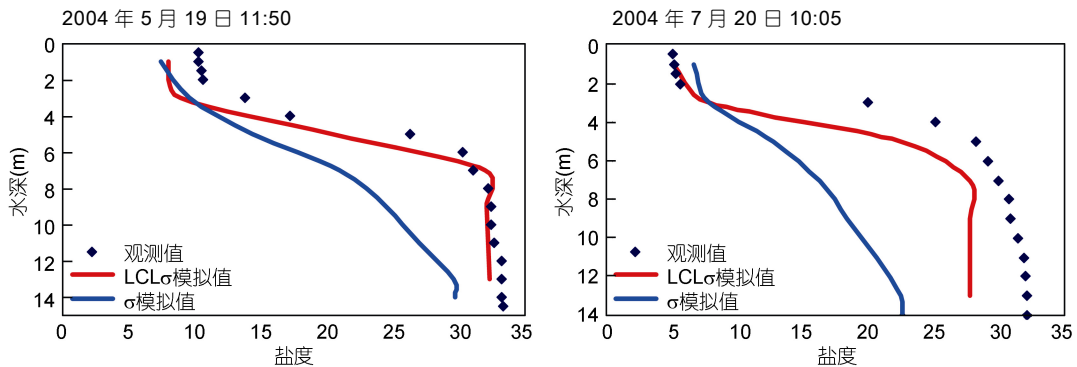


图 7 盐度模拟结果比较

Fig.7 The simulated and observed salinity

表1 LCL σ 坐标与 σ 坐标在垂直剖面上的盐度模拟结果比较(2004.05.19)
Tab.1 Simulated salinity in LCL σ coordinates and σ coordinates of May 19th, 2004

水深	观测值	σ 坐标	LCL σ 坐标	σ 坐标与观测值		LCL σ 坐标与观测值		平均相对误差		平均绝对误差	
				绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差	σ 坐标	LCL σ 坐标	σ 坐标	LCL σ 坐标
1	10.2	7.4	8.0	2.8	27.5%	2.2	21.6%				
3	13.8	9.6	8.9	4.2	30.4%	4.9	35.5%	34.5%	26.5%	6.3	4.3
5	26.3	14.3	20.4	12.0	45.6%	5.9	22.4%				
7	31.0	20.9	32.0	10.1	32.6%	1.0	3.2%				
9	32.4	24.5	32.1	7.9	24.4%	0.3	0.9%	21.3%	2.1%	6.8	0.7
11	32.6	26.9	32.1	5.7	17.5%	0.5	1.5%				
13	33.2	29.6	32.3	3.6	10.8%	0.9	2.7%				

表2 LCL σ 坐标与 σ 坐标在垂直剖面上的盐度模拟结果比较(2004.07.20)
Tab.2 Simulated salinity in LCL σ coordinates and σ coordinates on July 20th, 2004

水深	观测值	σ 坐标	LCL σ 坐标	σ 坐标与观测值		LCL σ 坐标与观测值		平均相对误差		平均绝对误差	
				绝对误差	相对误差	绝对误差	相对误差	σ 坐标	LCL σ 坐标	σ 坐标	LCL σ 坐标
1	5.2	6.7	5.1	1.5	28.8%	0.1	1.999%				
3	20.0	7.8	7.8	12.2	61.0%	12.2	61.0%	48.3%	20.8%	9.7	6.0
5	28.2	12.7	22.5	15.5	55.0%	5.7	20.2%				
7	30.0	16.3	27.8	13.7	45.7%	2.2	7.3%				
9	30.9	18.4	27.8	12.5	40.5%	3.1	10.0%	37.9%	10.9%	11.8	3.4
11	31.9	20.6	27.8	11.3	35.4%	4.1	12.9%				
13	32.1	22.5	27.8	9.6	29.9%	4.3	13.4%				

从表1、表2可以看出,关于2004年4月19日和2004年7月20日的盐度模拟结果:表层(水深1m—5m)LCL σ 坐标平均绝对误差分别为4.3、6.0,平均相对误差分别为26.5%、20.8%; σ 坐标下,分别为6.3、9.7,34.5%、48.3%。在水深急剧变化的7m水深处起其平均绝对误差分别仅为0.7、3.4;平均相对误差分别仅为2.1%、10.9%;而在 σ 坐标下,分别为6.8、11.8,21.3%、37.9%。由此可见,LCL σ 坐标模拟精度整体要优于 σ 坐标,特别是在水深变化剧烈处,其模拟精度更加明显,分别可达3.5倍和10倍左右。

结合图7可知:LCL σ 坐标不论在模拟值还是在变化趋势上都比较接近真实的观测值,特别在水深变化剧烈处起,LCL σ 坐标平均绝对误差更低,模拟将更加精确;而 σ 坐标由于压强梯度力在深水航道(水深变化剧烈的地方)离散出现较大误差,平均绝对误差反而增大,导致模拟结果与实际不符。采用LCL σ 坐标后,使得压强梯度力离散误差降到最小,与实际观测相符合。由此可见,在水深变化剧烈的地方,LCL σ 坐标的优势更加明显,更能反映实际观测的物理现象。

4 结语

利用数值模型研究莫比尔湾这种水深变化剧烈的海湾盐度分布发现,采用新型的LCL σ 坐标比传统的 σ 坐标具有独特的优势,模拟结果更符合实际,为以后解决盐度的数值模拟问题提供了一种新方法。

致谢 本文采用的资料数据是由 hamrick.ftp 提供,谨此致谢。

参 考 文 献

- 孙文心,江文胜,李磊,2004.近海环境流体动力学.北京:科学出版社,248—249.
- Berntsen J, Furnes G, 2005. Internal pressure errors in sigma-coordinate ocean models-sensitivity of the growth of the flow to the time stepping method and possible non-hydrostatic effects. *Continental Shelf Research*, 25: 829—848.
- Haney R, 1991. On the pressure gradient force over steep topography in sigma-coordinate Ocean models. *Journal of Physics Oceanography*, 21: 610—619
- Mellor G L, Oey LY, Ezer T, 1998. Sigma coordinate pressure gradient errors and the seamount problem. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15: 1112—1131

- Shchepetkin A F, McWilliams J C, 2003. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinates. *Journal of Geophysical Research*, 108: 1—35
- Tetra Tech, 2006. Theoretical and Computational Aspects of the Generalized Vertical Coordinate Option in the EFDC Model.

NUMERICAL SIMULATION OF SALINITY IN EFDC MODEL

LIU Jian-Bo¹, YU Yang-Hui¹, LIU Jie², WANG Dao-Ru¹, CHEN Chun-Hua¹, LIN Guo-Yao¹

(1. *Hainan Marine Development Plan and Design Institute, Haikou, 570125*; 2. *Hainan Medical University, Haikou, 571199*)

Abstract In steep topography areas, error in pressure gradient is often big due to the dissociation in vertical direction in a sigma coordinate, which would cause considerable bias in salinity that simulated. To solve this problem, using the Mobile Bay (30°13'—30°39'N, 87°45'—88°07'W) USA as an example of steep topography, we simulated the salinity of the bay in the EFDC (Environmental Fluid Dynamics Code) model in both sigma and LCL (Laterally Constrained Localized)-sigma coordinates. Results show that simulation in the LCL-sigma coordinate could minimize the truncation error that resulted from the pressure gradient force, and produce clear and good simulation results that are consistent with the physical realities. Therefore, we can apply the method for solving similar problems in the future.

Key words LCL σ coordinates; EFDC; salinity; pressure gradient force