

文章编号: 1674 - 5566(2012)04 - 0621 - 09

全球非结构网格有限体积法海洋模式东中国海潮汐计算初步分析

胡松¹, 陈长胜^{1,2}, 高郭平¹, 来志刚³, 葛建忠⁴, 林辉婵², 戚建华²

(1. 上海海洋大学 海洋生态系统与环境实验室, 上海 201306; 2. 美国麻省大学 海洋科学与技术学院, 美国麻省 02747; 3. 中山大学 海洋学院, 广东 广州 510275; 4. 华东师范大学 河口海岸国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 对全球非结构有限体积法海洋模式(Global-FVCOM)计算的全球海洋潮汐东中国海部分进行了验证。模式与资料的比较范围为24°N到41°N, 118°E到132°E。根据计算结果得出了东中国海的M₂、S₂、K₁、O₁分潮的同潮图。分潮计算结果与东中国海区域99个实测站点比较结果总体较好, 局部区域水深和网格精度欠缺导致偏差偏大。M₂分潮振幅均方根偏差为15 cm, 迟角均方根偏差为10°, K₁分潮振幅均方根偏差为8.2 cm, 迟角均方根偏差为9°。初步结果将有利于进一步建立全球多尺度潮流-洋流耦合模型。

研究亮点: 采用全球一体化的非结构有限体积法模式计算了全球潮汐, 东海潮汐比较结果表明模式较好地反演了该地区潮汐特征。全球模式的研究有助于加深对全球变化和近海变化的理解, 具有广阔的研究前景。

关键词: 全球; 非结构有限体积法海洋模式; 东中国海; 潮汐; 验证

中图分类号: P 733

文献标志码: A

有关东中国海潮汐的研究很多, 包括CHOI^[1], OGURA^[2], FANG^[3]等许多学者^[4-9]的研究基本确定了东中国海潮汐的分布特征。目前人们建立的全球大洋潮汐模式有数十种^[10-16], 近几年国内也有利用引潮力驱动非结构有限体积法模式来计算全球潮汐的研究^[17]。但总体而言, 运用包含完整水动力框架的全球海洋模式来研究东中国海区域的探讨较少。

近海动力因子复杂, 兼受到全球变化的影响, 这使得我们需要能够同时考虑全球和近海变化因子的海洋模型来研究近海生态环境。然而, 大部分近海和河口岛屿复杂, 海岸线弯曲, 潮间带多变, 传统模式(如POM^[18], ECOM-si^[19]等)难以拟合这些不规则几何形状和复杂动力特征; 其次, 传统区域海洋模型往往由粗网格大区域计算结果插值到细网格小模型边界上进行驱动, 容易导致边界处信息的丢失。非结构网格在拟合复杂岸线和底形方面有优势; 有限体积法在数值计算过程中可以严格保证质量守恒性; 非结构网格

可以灵活地局部加密重点区域, 同时大小模式的边界条件可以平滑过渡。因此, 美国麻省大学以非结构网格有限体积法海洋模型(FVCOM^[20-22])为核心开发了全球海洋模式(Global-FVCOM), 计算网格节点覆盖全球海域, 北极点进行了处理^[23], 并考虑各种驱动因子进行了初步运算。

本文分析Global-FVCOM模式结果, 对东中国海区域进行了潮汐调和与分析, 同潮图分布特征和前人一致。潮汐调和常数与99个站点实测资料进行了比较, 符合程度令人满意, 本研究将为进一步研究全球变化对东中国海区域影响提供基础。

1 FVCOM 模式简介

FVCOM是基于海洋原始方程的三维海洋数值模型, 水平方向采用非结构三角元有限体积算法。Global-FVCOM模式网格采用球坐标网格, 其控制方程如下

收稿日期: 2011-11-15 修回日期: 2011-12-01

基金项目: 上海市科学技术委员会重点项目(09320503700); 上海市教育委员会重点学科建设项目(J50702); 上海海洋大学国际合作项目(A-3605-12-0001)

作者简介: 胡松(1978—), 男, 副教授, 研究方向为海洋生态系统动力学。E-mail: shu@shou.edu.cn

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \varphi} \left[\frac{\partial u^2 D}{\partial \lambda} + \frac{\partial uv \cos \varphi}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial u \bar{\omega}}{\partial \sigma} + \frac{wD}{r} \tan \varphi - \frac{wuD}{r} - fvD = - \frac{gD}{r \cos \varphi} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{gD}{\rho_0 r \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial \lambda} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + DF_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \varphi} \left[\frac{\partial vwD}{\partial \lambda} + \frac{\partial v^2 \cos \varphi}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial v \bar{\omega}}{\partial \sigma} - \frac{u^2 D}{r} \tan \varphi - \frac{wvD}{r} + fuD = - \frac{gD}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi} - \frac{gD}{\rho_0 r} \left[\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(D \int_{\sigma}^0 \rho d\sigma' \right) + \sigma \rho \frac{\partial D}{\partial \varphi} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + DF_v \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \varphi} \left[\frac{\partial uD}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \cos \varphi D}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \varphi} \left[\frac{\partial TuD}{\partial \lambda} + \frac{\partial Tv \cos \varphi D}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial T \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + D \hat{H} + DF_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{1}{r \cos \varphi} \left[\frac{\partial SuD}{\partial \lambda} + \frac{\partial Sv \cos \varphi D}{\partial \varphi} \right] + \frac{\partial S \omega}{\partial \sigma} = \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + DF_S \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (6)$$

式中： φ 为纬度； λ 为经度； σ 为水层系数； r 为地球平均半径； D 为水体总深度； u 为东向流速； v 为北向流速； w 为垂向流速； T 为温度； S 为盐度； ρ 为密度； P 为压强； f 为科氏力参数； g 为重力加速度； K_m 为垂向湍流系数； K_h 为垂向扩散系数； \hat{H} 短波热通量项； DF_u 和 DF_v 分别为 u 、 v 的水平扩散项； DF_T 和 DF_S 分别为温度和盐度的水平扩散项。FVCOM 垂向湍流系数由 MELLOR-YAMADA 2.5 湍流模式^[24] 计算得出，水平扩散项由 SMAGORINSKY 公式^[25] 求得。

2 计算设置

Global-FVCOM 是美国麻省大学开发的新一代非结构全球海洋模式。其计算区域覆盖全球海域，包含太平洋、大西洋、印度洋、北冰洋以及各大洋的边缘海(图 1)。计算网格节点总数为 217 436，三角形个数为 425 146。近海动力因子相对于大洋较为复杂，因此 Global-FVCOM 在近海区域精度较高，可达 10 ~ 40 km，而在大洋深海区域，网格精度可为 50 ~ 70 km。在本次计算中，东中国海区域多数网格精度约为 10 ~ 20 km (图 1)。陆架外缘大陆坡处水深变化剧烈，对此区域计算网格加密。

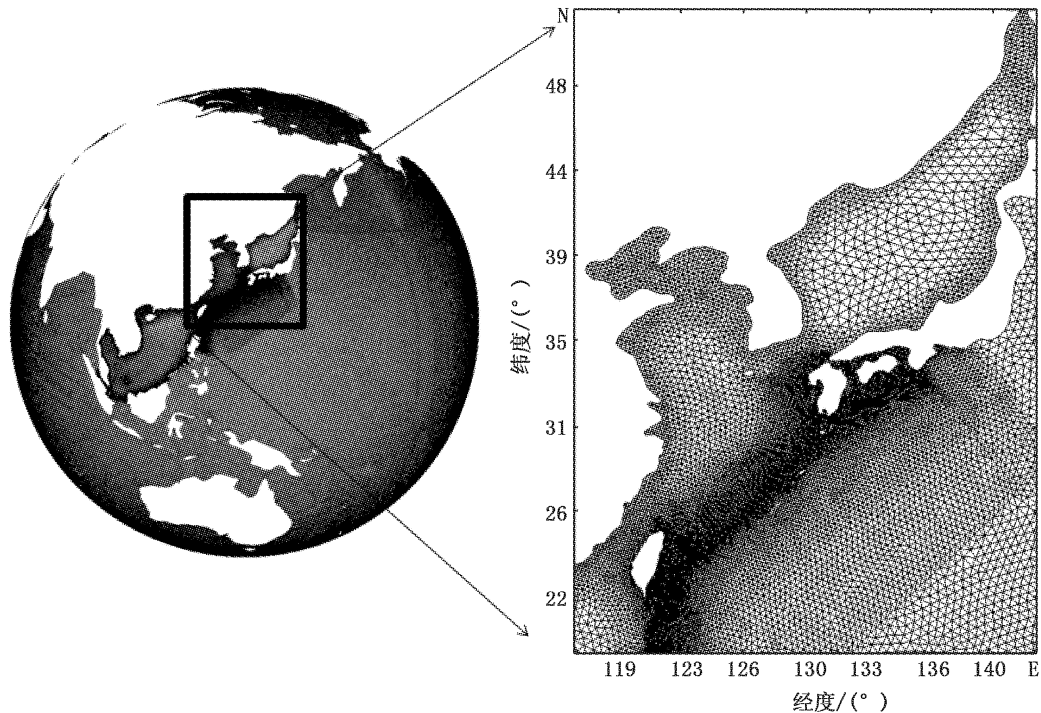


图 1 Global-FVCOM 全球网格和东中国海区域网格示意图
Fig.1 Grids for Global-FVCOM model and East China Sea subdomain

全球网格水深底形数据由 DBDB5 和 IBCAO^[26] 资料插值到各个网格节点上。垂向采用混合 (HYBRID) 坐标分层。总共为 45 层。水深大于 225 m 的海域采用 s 坐标系: 海洋表面厚度 50 m 的上表层和海洋底部 15 m 厚度层为等厚度分层, 分辨率为 5 m; 其余各层则采用随深度变化坐标函数分层。在水深浅于或等于 225 m 采用 σ 坐标系, 垂向分层由深水可变分层到浅水逐步过渡到均匀分层, 垂向分率等于或小于 5 m。225 m 为 s 坐标与 σ 坐标分界水深, 此处为均匀分层, 分辨率为 5 m。

Global-FVCOM 的驱动力包括潮汐、风、大气压、热通量、降水与蒸发、河淡水通量以及海冰。这里我们仅分析潮汐结果。潮汐模式由 8 个天文分潮 M_2 、 N_2 、 S_2 、 K_2 、 K_1 、 P_1 、 O_1 和 Q_1 产生的平衡潮驱动。各天文分潮参数与文献 23 相同, 如表 1 所示, 模式考虑了固体潮^[27] 的潮汐订正。模式对水位的计算采用的半隐式格式^[28-29], 可以优化计算步长, 半隐参数选为 0.55。模式计算时间步长 400 s, 计算起始时间为 2009 年 1 月 1 日, 计算 80 d, 每小时保存一次全场瞬时三维流场和温度盐度结果。通过最小二乘法程序对结果进行调和与分析, 并与观测站点潮汐振幅和迟角进行比较。图 2 为观测站点示意图, 区域为东中国海。

表 1 模式中各分潮参数

Tab. 1 Parameters of each tidal constituent used in the model

分潮	振幅/cm	固体潮 Love 系数	周期/s
Q_1	1.927 3	0.695	96 726
O_1	10.066 1	0.695	92 950
P_1	4.684 8	0.706	86 637
K_1	14.156 5	0.736	86 164
N_2	4.639 7	0.693	45 570
M_2	24.233 4	0.693	44 712
S_2	11.274 3	0.693	43 200
K_2	3.068 4	0.693	43 082

FVCOM 模式利用 MPI 技术进行了并行化处理。模式代码通过 METIS^[30] 进行区域分解, 并保证区域之间数据交换尽量少。由于计算区域网格三角元达到 425 146, 在计算时设置 256 个子进程以满足最大的计算需求。图 3 为并行计算中子区域的划分示例, 每个子区域约包含 1 600 ~ 1 700 个三角形, 子进程之间通过不同节点计算域

的公共边界来交换计算数据。在上海海洋大学海洋生态系统与环境实验超级计算集群上, 用 32 台服务器节点 (英特尔处理器 E5450), Global-FVCOM 潮汐模式计算 365 d 约需 20 ~ 24 h 机时。

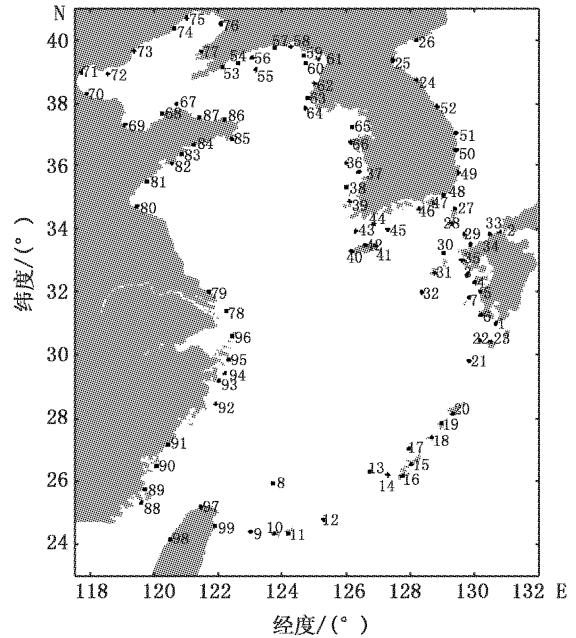


图 2 潮汐观测站点分布图

Fig. 2 Locations of tide observations



图 3 并行过程中各子计算区域分布图

Fig. 3 Subdomains for parallel running

3 计算结果主要分潮分布

中国近海的潮波是由西北太平洋传入的协振动潮波和当地的月、日引潮力产生的强迫潮叠加而成的, 但是当地月、日引潮力产生的直接强迫作用比重很小。西北太平洋潮波从日本九州

与台湾岛之间传入东海,随后分为两支,大部分越过东海向北进入黄海,另一部分影响浙江、福建沿岸和台湾海峡,进入黄海的潮波,一部分在黄海北部分出一支进入渤海^[9]。

图 4 为水位计算结果分析的 M_2 分潮同潮图,全球模式很好地模拟了潮波传进东中国海的过程。在天文潮驱动下, M_2 潮波由九州和台湾岛之间的水道进入东海,然后沿着东中国海陆架传播,同潮时线呈并列分布,主要为前进波。向浙江和福建传播的 M_2 潮波,向左转进入台湾海峡。向北传播的 M_2 分潮,由于受到山东半岛南岸和黄海北部岸线的反射,形成两个逆时针旋转的驻波系统。存在两个明显的无潮点,分别在山东半岛外侧和海州湾外,均在入射潮波左侧。通过渤海海峡进入渤海 M_2 分潮,受到渤海西岸的反射,形成两个逆时针旋转的驻波系统,存在两个无潮点,分别位于秦皇岛和旧黄河口附近。图 5 为分析结果的 S_2 分潮同潮图,振幅较 M_2 小,分布特征和 M_2 较为类似。

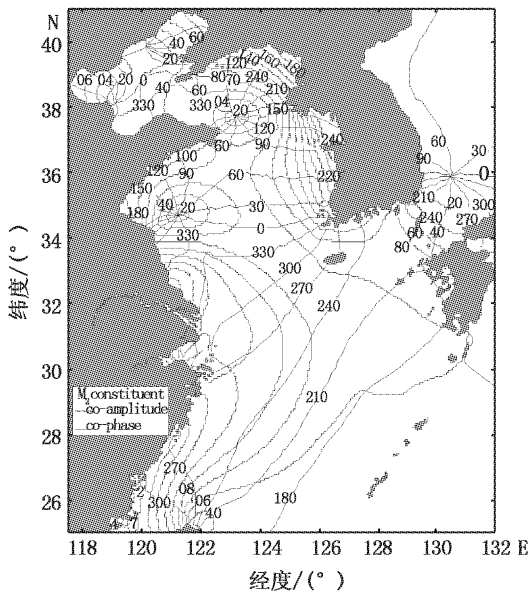


图 4 模型 M_2 分潮同潮图
Fig. 4 M_2 co-tidal chart

图 6 为分析结果的 K_1 分潮同潮图。相对于半日潮,东中国海全日潮振幅较小。由图可见,在渤海口和南黄海各存在一个明显的无潮点,形成两个逆时针旋转系统。图 7 为 O_1 分潮同潮图,振幅较小,分布特征与 K_1 分潮较为类似。

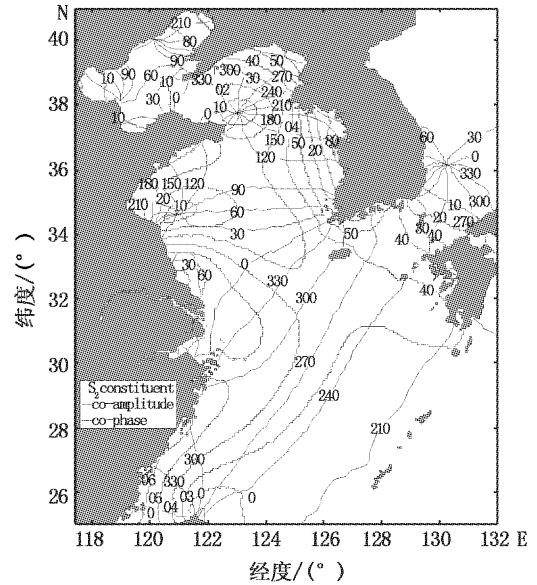


图 5 模型 S_2 分潮同潮图
Fig. 5 S_2 co-tidal chart

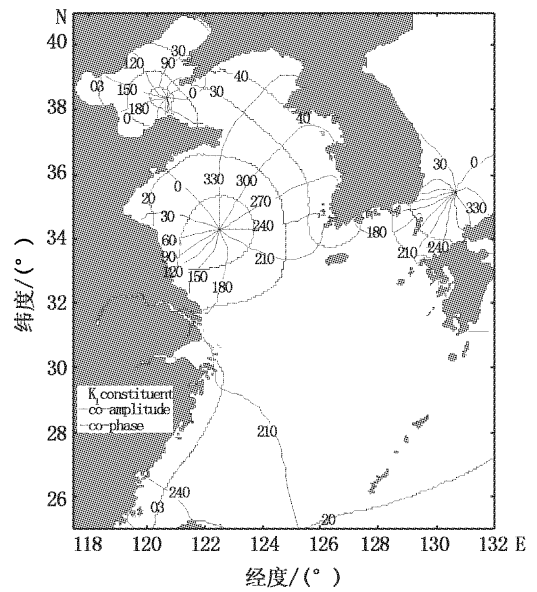
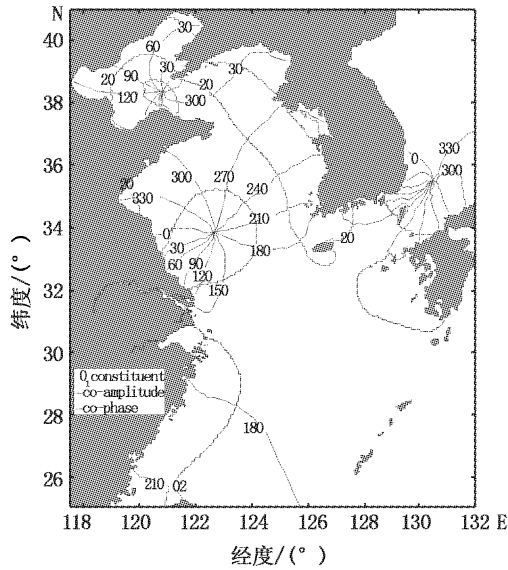


图 6 模型 K_1 分潮同潮图
Fig. 6 K_1 co-tidal chart

上述对于 Global-FVCOM 计算结果的调和和分析表明,Global-FVCOM 的全球潮波模拟在东中国海的结果符合以往对东中国海潮波分布特征的认识,可以作为进一步实施考虑全球变化的近海潮流环流综合预报系统的基础。

图7 模型 O_1 分潮同潮图Fig. 7 O_1 co-tidal chart

4 计算结果与实测结果比较

东中国海区域 M_2 分潮调和与分析结果与实测比较如表 2 所示。比较结果大体较好,在个别站点有较大偏差。在第 69、92、97 和 98 等站点振幅偏差较大,分别为 -35.3 cm、 -35.9 cm、 -48.6 cm 和 48.8 cm,迟角偏差在第 69 站和第 70 站较大,分别为 -30.9° 和 -27.6° 。总体而言,振幅均方根偏差为 15 cm,迟角均方根偏差为 10° 。

东中国海区域 K_1 分潮调和与分析结果与实测比较如表 3 所示。在第 57、58、88 和 98 等站点振幅偏差较大,分别为 20.6 cm、 20.3 cm、 21.5 cm 和 30.4 cm,迟角偏差在第 2、49、50 和 77 站较大,分别为 -26° 、 20.3° 、 27.7° 和 26.4° 。总体而言,振幅均方根偏差为 8.2 cm,迟角均方根偏差为 9° 。Global-FVCOM 总体结果较为满意,在部分站点偏差较大。全球模式采用天文平衡潮驱动,不存在开边界设定导致的偏差,这可能是由于部分局地水深精确度和分辨率不够的原因。

5 结论

全球 Global-FVCOM 潮汐较好地模拟出东中国海潮汐特征,初步结果与东中国海区域近海 99 个实测站点比较表明, M_2 振幅均方根偏差为 15 cm,迟角均方根偏差为 10° , K_1 振幅均方根偏差为 8.2 cm,迟角均方根偏差为 9° 。可见,该模式不仅计算全球尺度的潮汐,而且在东中国海区域的部分底形数据不够精确的情况下,潮波分布结果仍然较为符合现有实测资料。总体而言,Global-FVCOM 全球潮汐模拟系统的建立和测试为进一步实现多尺度全球海洋潮流-环流模式提供了基础。下一步研究应当包括增加中国近海网格分辨率和提高地形水深精度。

表2 M₂分潮观测与模型比较Tab. 2 M₂ comparison between observations and model

站点	位置		振幅对比/cm			迟角对比/(°)			站点	位置		振幅对比/cm			迟角对比/(°)		
	东经	北纬	观测	模型	偏差	观测	模型	偏差		东经	北纬	观测	模型	偏差	观测	模型	偏差
1	130.68	31.02	69	72.6	3.6	177	180.1	3.1	51	129.43	37.07	5	5.5	0.5	69	86	17
2	130.82	33.92	37	50.2	13.2	262	252.9	-9.1	52	128.83	37.90	6	6.8	0.8	61	74	13
3	129.78	32.55	86	96.7	10.7	205	205	0	53	122.10	39.13	105	98.7	-6.3	284	294.6	10.6
4	130.02	32.32	83	97.5	14.5	200	201	1	54	122.58	39.27	122	122.9	0.9	274	277.7	3.7
5	130.18	32.03	80	91.5	11.5	197	197.8	0.8	55	123.15	39.07	122	109.1	-12.9	262	262.4	0.4
6	130.22	31.28	74	80.1	6.1	183	187.1	4.1	56	123.05	39.45	158	136	-22	265	271.6	6.6
7	129.85	31.85	76	85.7	9.7	198	197.6	-0.4	57	123.75	39.75	187	187.5	0.5	253	262.3	9.3
8	123.68	25.93	45	51.6	6.6	200	186.1	-14	58	124.27	39.80	212	208.4	-3.6	255	263.9	8.9
9	123.00	24.42	42	46.7	4.7	173	179.4	6.4	59	124.67	39.52	208	198.6	-9.4	246	249.1	3.1
10	123.73	24.33	45	48.1	3.1	183	178.5	-4.5	60	124.72	39.27	192	183.1	-8.9	238	239.4	1.4
11	124.17	24.33	46	49.2	3.2	175	175.1	0.1	61	125.12	39.42	212	203.4	-8.6	266	241.4	-24.6
12	125.28	24.80	53	51.7	-1.3	178	174.2	-3.8	62	125.00	38.63	156	148.3	-7.7	216	215.8	-0.2
13	126.73	26.33	56	55.9	-0.1	176	176.6	0.6	63	124.78	38.18	114	112.5	-1.5	191	184.3	-6.7
14	127.30	26.22	57	56.1	-0.9	176	174.3	-1.7	64	124.72	37.83	99	92	-7	143	155.3	12.3
15	128.03	26.55	56	54.4	-1.6	161	166.6	5.6	65	126.17	37.23	251	248.4	-2.6	117	118.4	1.4
16	127.78	26.18	55	55.1	0.1	165	167.3	2.3	66	126.13	36.78	220	215.7	-4.3	87	89.5	2.5
17	127.97	27.05	52	56.2	4.2	175	176	1	67	120.68	37.98	46	36.5	-9.5	282	306.2	24.2
18	128.67	27.40	50	56.3	6.3	164	170.8	6.8	68	120.22	37.68	35	15.8	-19.2	320	301.8	-18.2
19	128.97	27.87	52	57	5	164	173.8	9.8	69	119.05	37.33	40	4.7	-35.3	325	294.1	-30.9
20	129.32	28.15	55	59.2	4.2	174	169	-5	70	117.87	38.32	80	62.4	-17.6	125	97.4	-27.6
21	129.85	29.83	58	63.2	5.2	172	176.8	4.8	71	117.70	39.00	94	65.6	-28.4	91	82.1	-8.9
22	130.18	30.47	63	70.3	7.3	175	181	6	72	118.52	38.93	60	42.2	-17.8	58	64.7	6.7
23	130.52	30.45	65	69.8	4.8	176	180.9	4.9	73	119.35	39.67	12	13.3	1.3	340	350.8	10.8
24	128.20	38.75	7	7.2	0.2	59	72.6	13.6	74	120.58	40.38	60	55.4	-4.6	152	160.4	8.4
25	127.45	39.37	9	7.7	-1.3	63	74.1	11.1	75	120.98	40.72	93	82.1	-10.9	150	157	7
26	128.20	40.00	8	7.3	-0.7	62	71.1	9.1	76	122.07	40.53	110	98.1	-11.9	134	138.1	4.1
27	129.38	34.65	45	53.2	8.2	231	226.7	-4.3	77	121.47	39.65	54	39.3	-14.7	82	98.2	16.2
28	129.30	34.20	53	75.3	22.3	229	233.5	4.5	78	122.23	31.42	125	136.8	11.8	309	313.7	4.7
29	129.68	33.85	60	76.2	16.2	246	239.4	-6.6	79	121.70	32.02	110	155	45	346	345.1	-0.9
30	129.05	33.27	78	90.5	12.5	230	233	3	80	119.43	34.75	160	133.7	-26.3	178	174.8	-3.2
31	128.77	32.62	82	92.1	10.1	208	217.2	9.2	81	119.75	35.53	120	113.5	-6.5	145	145.7	0.7
32	128.35	32.00	70	77.1	7.1	207	212.3	5.3	82	120.53	36.10	115	99	-16	122	116	-6
33	130.48	33.85	46	55.4	9.4	256	255.4	-0.6	83	120.83	36.38	120	112	-8	112	104.5	-7.5
34	129.88	33.53	59	80.2	21.2	239	244.3	5.3	84	121.23	36.68	110	110.4	0.4	95	92.7	-2.3
35	129.62	33.03	84	105.5	21.5	212	222.8	10.8	85	122.40	36.87	86	69.1	-16.9	54	53	-1
36	125.98	36.12	179	192.2	13.2	65	66.9	1.9	86	122.17	37.50	59	53.8	-5.2	303	323.9	20.9
37	126.40	35.82	204	206.6	2.6	59	61.4	2.4	87	121.38	37.55	60	57.7	-2.3	300	309	9
38	126.02	35.35	169	161.6	-7.4	44	45.6	1.6	88	119.58	25.33	210	230.7	20.7	318	304	-14
39	126.10	34.88	142	149.8	7.8	17	28.5	11.5	89	119.68	25.75	210	221.6	11.6	308	292.3	-15.7
40	126.15	33.30	76	88.2	12.2	287	282.4	-4.6	90	120.05	26.50	210	203.1	-6.9	290	277.4	-12.6
41	126.90	33.50	66	87	21	256	265.5	9.5	91	120.42	27.17	200	181.2	-18.8	272	262.5	-9.5
42	126.58	33.52	66	80.5	14.5	284	281.8	-2.2	92	121.90	28.45	170	134.1	-35.9	256	246.3	-9.7
43	126.28	33.95	84	102.8	18.8	298	293.4	-4.6	93	122.02	29.20	150	128.8	-21.2	252	260.1	8.1
44	126.85	34.18	96	130.2	34.2	271	268.6	-2.4	94	122.20	29.43	130	112.5	-17.5	257	269.1	12.1
45	127.30	34.00	92	113.1	21.1	252	254.2	2.2	95	122.32	29.85	120	130.9	10.9	265	283.4	18.4
46	128.27	34.65	85	98.8	13.8	229	227.2	-1.8	96	122.42	30.62	120	142.5	22.5	286	292.1	6.1
47	128.72	34.83	60	79.5	19.5	216	216	0	97	121.43	25.18	100	51.4	-48.6	319	300.3	-18.7
48	129.03	35.10	39	53.2	14.2	212	205.2	-6.8	98	120.48	24.18	148	196.8	48.8	327	307.6	-19.4
49	129.50	35.80	5	8	3	160	148.8	-11	99	121.87	24.58	44	44.9	0.9	169	180.1	11.1
50	129.43	36.52	4	5.1	1.1	90	109.9	19.9	均方根偏差			15 cm			10°		

表 3 K_1 分潮观测与模型比较Tab. 3 K_1 comparison between observations and model

站点	位置		振幅对比/cm			迟角对比/(°)			站点	位置		振幅对比/cm			迟角对比/(°)		
	东经	北纬	观测	模型	偏差	观测	模型	偏差		东经	北纬	观测	模型	偏差	观测	模型	偏差
1	130.68	31.02	24	26.7	2.7	183	190.4	7.4	51	129.43	37.07	4	5.4	1.4	-11	343	-6
2	130.82	33.92	12	14.3	2.3	288	262.1	-26	52	128.83	37.90	5	5.5	0.5	-1	347.1	-11.9
3	129.78	32.55	25	31	6	193	199	6	53	122.10	39.13	29	45.6	16.6	0	4.7	4.7
4	130.02	32.32	24	30.7	6.7	195	197.3	2.3	54	122.58	39.27	33	50.3	17.3	357	354.5	-2.5
5	130.18	32.03	25	29.9	4.9	196	196.6	0.6	55	123.15	39.07	37	47.5	10.5	344	345.9	1.9
6	130.22	31.28	25	28.7	3.7	190	192.6	2.6	56	123.05	39.45	35	52.6	17.6	354	350.9	-3.1
7	129.85	31.85	30	29.4	-0.6	193	196.8	3.8	57	123.75	39.75	38	58.6	20.6	341	344.9	3.9
8	123.68	25.93	20	23.6	3.6	221	227.4	6.4	58	124.27	39.80	41	61.3	20.3	346	347.7	1.7
9	123.00	24.42	18	22.2	4.2	221	232.3	11.3	59	124.67	39.52	42	59.2	17.2	336	338.1	2.1
10	123.73	24.33	21	21.5	0.5	223	230.5	7.5	60	124.72	39.27	40	58.1	18.1	331	333.3	2.3
11	124.17	24.33	20	21.1	1.1	221	228.8	7.8	61	125.12	39.42	48	59.8	11.8	340	334.3	-5.7
12	125.28	24.80	17	20.5	3.5	221	223.6	2.6	62	125.00	38.63	43	55	12	313	324.2	11.2
13	126.73	26.33	20	21.2	1.2	202	213	11	63	124.78	38.18	42	50.1	8.1	316	318	2
14	127.30	26.22	19	20.7	1.7	203	211.5	8.5	64	124.72	37.83	36	45.7	9.7	306	313.4	7.4
15	128.03	26.55	20	20.3	0.3	204	205.1	1.1	65	126.17	37.23	45	49.8	4.8	289	293.6	4.6
16	127.78	26.18	22	20.3	-1.7	199	207.4	8.4	66	126.13	36.78	37	44.5	7.5	279	282.5	3.5
17	127.97	27.05	19	20.8	1.8	201	207	6	67	120.68	37.98	9	13	4	237	257.4	20.4
18	128.67	27.40	21	21	0	200	202.3	2.3	68	120.22	37.68	20	26.2	6.2	210	213.2	3.2
19	128.97	27.87	21	21.3	0.3	196	201	5	69	119.05	37.33	28	34.8	6.8	185	196.8	11.8
20	129.32	28.15	21	22.2	1.2	197	197	0	70	117.87	38.32	40	45.4	5.4	160	170.6	10.6
21	129.85	29.83	23	24.3	1.3	189	194.1	5.1	71	117.70	39.00	35	45.2	10.2	150	163.2	13.2
22	130.18	30.47	23	26.3	3.3	190	192.8	2.8	72	118.52	38.93	30	39.3	9.3	145	158.5	13.5
23	130.52	30.45	24	26.5	2.5	192	193.2	1.2	73	119.35	39.67	30	36.9	6.9	115	133	18
24	128.20	38.75	5	5.7	0.7	-10	347.7	-2.3	74	120.58	40.38	39	44.4	5.4	110	118.4	8.4
25	127.45	39.37	5	5.8	0.8	-8	349.4	-2.6	75	120.98	40.72	38	48.5	10.5	108	117.6	9.6
26	128.20	40.00	6	5.8	-0.2	-15	347.3	2.3	76	122.07	40.53	40	50.9	10.9	100	108.9	8.9
27	129.38	34.65	6	8.1	2.1	206	188.5	-18	77	121.47	39.65	35	39.4	4.4	70	96.4	26.4
28	129.30	34.20	8	15	7	198	205.5	7.5	78	122.23	31.42	23	29.6	6.6	184	182.6	-1.4
29	129.68	33.85	16	17.8	1.8	236	225.3	-11	79	121.70	32.02	25	26.7	1.7	152	159.4	7.4
30	129.05	33.27	20	23.7	3.7	212	214.1	2.1	80	119.43	34.75	35	31.9	-3.1	20	33.6	13.6
31	128.77	32.62	25	30.6	5.6	195	203.4	8.4	81	119.75	35.53	30	29.1	-0.9	10	23.7	13.7
32	128.35	32.00	32	28.1	-3.9	209	202	-7	82	120.53	36.10	32	26.4	-5.6	0	13	13
33	130.48	33.85	13	17.1	4.1	263	256.5	-6.5	83	120.83	36.38	30	27.7	-2.3	357	5.6	8.6
34	129.88	33.53	16	22.2	6.2	238	235.1	-2.9	84	121.23	36.68	30	27.3	-2.7	352	358.7	6.7
35	129.62	33.03	27	31.9	4.9	217	208.8	-8.2	85	122.40	36.87	26	28.8	2.8	336	336.2	0.2
36	125.98	36.12	33	40.2	7.2	274	271.9	-2.1	86	122.17	37.50	22	28.7	6.7	309	327.7	18.7
37	126.40	35.82	34	41.1	7.1	261	267.7	6.7	87	121.38	37.55	20	20.8	0.8	305	318	13
38	126.02	35.35	32	36.9	4.9	255	259.9	4.9	88	119.58	25.33	28	49.5	21.5	255	258.1	3.1
39	126.10	34.88	32	37.5	5.5	237	248.1	11.1	89	119.68	25.75	30	45.1	15.1	245	249.9	4.9
40	126.15	33.30	31	30.8	-0.2	201	208.8	7.8	90	120.05	26.50	30	41.3	11.3	232	243.5	11.5
41	126.90	33.50	23	28.6	5.6	199	201.9	2.9	91	120.42	27.17	30	38.3	8.3	232	237.1	5.1
42	126.58	33.52	25	28.5	3.5	208	210	2	92	121.90	28.45	30	35.2	5.2	226	222.9	-3.1
43	126.28	33.95	26	33.5	7.5	205	207.1	2.1	93	122.02	29.20	30	36	6	223	218.8	-4.2
44	126.85	34.18	25	34.7	9.7	193	191.8	-1.2	94	122.20	29.43	30	35.7	5.7	220	216	-4
45	127.30	34.00	24	30.6	6.6	186	190.6	4.6	95	122.32	29.85	30	35.6	5.6	215	211.8	-3.2
46	128.27	34.65	16	20.2	4.2	171	169.4	-1.6	96	122.42	30.62	30	34.6	4.6	198	203.1	5.1
47	128.72	34.83	9	15.3	6.3	147	150.6	3.6	97	121.43	25.18	20	27.1	7.1	248	256	8
48	129.03	35.10	4	10	6	129	130.6	1.6	98	120.48	24.18	18	48.4	30.4	268	268.5	0.5
49	129.50	35.80	4	4.6	0.6	10	30.3	20.3	99	121.87	24.58	18	22.8	4.8	225	233.7	8.7
50	129.43	36.52	4	5.5	1.5	330	357.7	27.7	均方根偏差			8.2 cm			9°		

参考文献:

- [1] CHOI B H. A tidal model of the Yellow Sea and the eastern China Sea. KORDI Report [G]. Korea Ocean Research and Development Institute, 1980; 72.
- [2] OGURA S. The tides in the northern part of the Hwang Hai [J]. Japanese Journal of Astronomy and Geophysics, 1936, 14(1): 27-55.
- [3] FANG G H. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1986, 4(1): 1-16.
- [4] 于克俊,张法高. 渤海潮波运动的三维数值计算[J]. 海洋与湖沼, 1987, 18(3): 227-236.
- [5] 叶安乐,梅丽明. 渤黄东海潮波数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(1): 63-70.
- [6] 沈育疆. 东中国海潮汐数值计算[J]. 山东海洋学院学报, 1980, 10(3): 26-35.
- [7] 赵保仁,方国洪,曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(5): 1-10.
- [8] 张衡,朱建荣,吴辉. 东海黄海渤海8个主要分潮的数值模拟[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2005(3): 71-77.
- [9] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京:海洋出版社, 2006.
- [10] 汪一航,方国洪,魏泽勋,等. 基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 353-359.
- [11] SCHWIDERSKI E W. On charting global ocean tides[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1980, 18: 243-268.
- [12] CARTWRIGHT D E, RAY R D. Oceanic tides from Geosat altimetry[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 3069-3090.
- [13] LE PROVOST C, GENCO M L, LYARD F, et al. Spectroscopy of the world ocean tides from a finite element hydrodynamic model[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24777-24797.
- [14] MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan[J]. Journal of Oceanography, 2000, 56: 567-581.
- [15] ECBERT G D, BENNETT A, FOREMAN M. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99: 24821-24852.
- [16] KANTHA L. Barotropic tide in the global ocean from a non-linear tidal model assimilating altimetry tides: I Model description and result[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 25283-25308.
- [17] YU H, CHEN X, BAO X, et al. A novel high resolution model without open boundary conditions applied to the China Seas: first investigation on tides [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(6): 12-25.
- [18] BLUMBERG A F, MELLOR G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model [J]. Three-dimensional Coastal Ocean Models, 1987, 4: 1-16.
- [19] 朱建荣,朱首贤. ECOM模式的改进及在长江河口、杭州湾及邻近海区的应用[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(4): 364-374.
- [20] CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: application to coastal ocean and estuaries[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [21] CHEN C, BEARDSLEY R C, COWLES G W. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. Special issue entitled "Advance in Computational Oceanography" [J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [22] CHEN C, BEARDSLEY R C, COWLES G W. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model FVCOM user manual [M]. School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts Dartmouth, New Bedford, 2006.
- [23] CHEN C, GAO G, QI J, et al. A new high-resolution unstructured grid finite volume Arctic Ocean model (AO-FVCOM): An application for tidal studies [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(C8): 1-20.
- [24] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(4): 851-875.
- [25] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [26] JAKOBSSON M, CHERKIS N, WOODWARD J, et al. A new grid of Arctic bathymetry: a significant resource for scientists and mapmakers[J]. EOS Transactions, American Geophysical Union, 2000, 81(9): 89-96.
- [27] FOREMAN M G G. Manual for tidal heights analysis and prediction [M]. Pacific Marine Science Report, Sidney, 1977.
- [28] LAI Z, CHEN C, COWLES G W, et al. A nonhydrostatic version of FVCOM; 2. Mechanistic study of tidally generated nonlinear internal waves in Massachusetts Bay[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(12): 1-21.
- [29] LAI Z, CHEN C, COWLES G W, et al. A nonhydrostatic version of FVCOM; 1. Validation experiments[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(11): 1-23.
- [30] KARYPIS G, KUMAR V. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 1998, 20(1): 359-392.

Preliminary analysis of tide simulation of the East China Sea of the Global-FVCOM model

HU Song¹, CHEN Chang-sheng^{1,2}, GAO Guo-ping¹, LAI Zhi-gang³, GE Jian-zhong⁴, LIN Hui-chan²,
QI Jian-hua²

(1. *Marine Ecosystem and Environmental Laboratory, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *School for Marine Science and Technology, University of Massachusetts-Dartmouth, Massachusetts MA 02747, USA*; 3. *College of Marine Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, Guangdong, China*; 4. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

Abstract: This study is aimed at validating the Global Finite Volume Community Ocean Model (Global-FVCOM) for tidal simulation in the East China Sea (ECS) (24°N to 41°N and 118°E to 132°E). The model-data comparisons were made for the amplitude and phase lag of M_2 , S_2 , K_1 and O_1 at 99 observations along the coast of the ECS. Generally, the model results agreed well with observations, except for areas where the resolution of grid does not resolve the local bathymetry well. The amplitude and phase lag root mean square errors are 15 cm and 10° for M_2 tide and 8.2 cm and 9° for K_1 tides. The results of Global-FVCOM provide a foundation for further development on establishing a multi-scale global-regional ocean model for the ECS research.

Key words: global; FVCOM; East China Sea; tide; validation