



厦门大学学报(自然科学版)
Journal of Xiamen University(Natural Science)
ISSN 0438-0479,CN 35-1070/N

《厦门大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 东中国海潮能通量与耗散的数值模拟
作者: 陈元杰, 程鹏
收稿日期: 2018-10-03
网络首发日期: 2019-01-23
引用格式: 陈元杰, 程鹏. 东中国海潮能通量与耗散的数值模拟[J/OL]. 厦门大学学报(自然科学版). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20190122.1056.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

东中国海潮能通量与耗散的数值模拟

陈元杰,程鹏✉

(厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361102)

✉通信作者 pcheng@xmu.edu.cn

摘要 东中国海是世界上潮能耗散较强的海区之一,研究东中国海潮能通量及潮能耗散有助于加深对东中国海混合和环流的认识。通过对东中国海的三维数值模拟,计算了潮能通量和耗散率。结果显示:传入东海、黄海、渤海的净潮能分别约为 88.333, 96.082 和 2.152 GW, 其耗散分别约为 79.168, 95.254 和 1.790 GW; 底摩擦耗散和垂向混合耗散分别占总耗散的 67.1%和 32.9%, 水平项扩散耗散量级较小, 可忽略不计; 东中国海高潮能耗散区主要分布于朝鲜半岛沿岸和浙闽沿岸、江苏北部和长江口外侧海域以及杭州湾海域。渤海中部、北黄海西南部、南黄海中部为低潮能耗散区。

关键词 东中国海; 潮汐; 潮能通量; 潮能耗散

中图分类号 P 731.23

文献标志码 A

DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.201808002

Numerical study of tidal energy and dissipation in the East China Seas

CHEN Yuanjie, CHENG Peng✉

(College Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract The East China Seas are one of the regions with strong tidal energy in the world. The study of tidal energy and dissipation helps understand the mixing and circulation in east China seas. Based on the Regional Ocean Modeling System, a three-dimensional numerical model of the East China Sea was developed to compute tidal energy and dissipation. The results showed that the net tidal energy flux of Bohai, Yellow, and East China Seas were about 2.152 GW, 96.082 GW, 88.33 GW, and the dissipation were about 1.790 GW, 95.254 GW, 79.168 GW; The bottom friction dissipation and vertical diffusion dissipation accounted for 67.1% and 32.9% of the total dissipation, and the horizontal diffusion dissipation accounted for less than 1% of the total dissipation. The high dissipation areas of the East China Seas were mainly distributed around the coast of the Korean Peninsula, the shoals of North Jiangsu, the Yangtze River subaqueous delta, the Hangzhou Bay and the coast of the Zhejiang and Fujian Provinces. The weak dissipation areas were located in the middle of Bohai Sea, the southwest of Yellow Sea, and the middle of South Yellow Sea.

Key words the East China Seas; tides; tidal energy flux; tidal dissipation

风和潮汐是驱动海洋内部混合的主要机械能来源^[1]。Munk 等^[1]得出有 3.5 TW 的能量通过潮汐传入海洋, 其中大部分潮能耗散在边缘海区域的底边界层中^[2]。底摩擦引起的潮能耗散表示为海底拖曳系数与摩阻流速三次方的乘积。由于浅海中地形与底质的空间分布不均匀, 潮能耗散在不同海域有着巨大的差异, 高耗能区常常出现在河口三角洲浅滩^[3]、群岛^[4]、海底岩床突起^[5]等区域。在河口海湾中, 地形和岸线的急剧变化而产生的形态阻力在摩擦力中起主导作用, 因而高潮能耗散往往发生在湾口岬角、浅滩及岸线束窄处^[6]。

东中国海作为太平洋的边缘海, 其范围大致包含渤海, 黄海、东海和一部分西太平洋。渤海深度相对较浅且地势较为平坦, 地形比较单调。黄海是全部位于大陆架上的一个半封闭的浅海, 地貌形态

收稿日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(41476004)

网络首发时间: 2019-01-23 10:51:06 网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/35.1070.N.20190122.1056.002.html>

比渤海复杂, 具有黄海槽、潮流脊和水下阶地等特征。东海西有广阔的大陆架, 东有深海槽, 兼有浅海和深海的特征, 但仍以浅海特征比较显著。由于地形影响, 东中国海潮波空间分布较为复杂, 是世界上潮能耗散较强的海区之一, 对东中国潮能通量及潮能耗散进行研究, 有助于加深对东中国海混合和环流的认识。

东中国海的潮能与耗散一直是研究热点。方国洪^[7]最早利用理论模型结合实测资料, 通过计算湾口与湾顶的潮能通量之比给出了黄海的耗散。此后的研究则主要运用数值模式, 张占海等^[8]和赵保仁等^[9]采用了二维数值模式, 前者计算渤海的潮能通量, 结果表明 M_2 分潮进入渤海海区的能量约为 6.05×10^9 J/s, 后者讨论了 M_2 和 m_1 分潮在渤、黄、东海潮能通量的传播和消耗情况, 并发现 m_1 分潮会有相当部分潮能被反射回太平洋。李培良等^[10]和朱学明等^[11]建立了三维数值模式, 计算了 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 分潮的在各海区的潮能通量。前者发现底部边界层耗散集中在江苏沿岸外海、长江口外侧周围大片海域、朝鲜沿岸以及台湾海峡。后者的研究表明潮能一半以上耗散在南黄海, 30%~40%耗散在东海, 而北黄海和渤海耗散较小。

前人众多研究中对潮能通量的来源与传播途径已经基本明确, 但其量值大小尚未有一致的结论, 特别地, 潮能耗散是通过计算东中国海各海区净潮能来获得, 对潮能耗散的形式和大小还缺乏深入的探究。本文建立东中国海的潮流数值模式, 计算潮能耗散的 3 个分量, 即底摩擦耗散、垂向潮合耗散和水平混合耗散, 以期了解潮能耗散形式及其不同地貌形态下的耗散特点。

1 数值模型与潮能平衡计算方法

1.1 模型设置

本研究所采用的海洋数值模式是区域海洋模式(regional ocean modeling system, ROMS)。ROMS 是三维非线性的斜压模式, 具有自由表面, 在基于静力假设和 Boussinesq 近似下, 求解雷诺平均下的 Navier-Stokes 方程。ROMS 使用有限差分法作为模式的离散方式。其在水平方向上采用曲线正交的 Arakawa C 网格, 在垂向上使用跟随地形可伸缩的 S 坐标系^[12]。所模拟的东中国海的范围为 $117^\circ \sim 135^\circ$ E, $24^\circ \sim 42^\circ$ N, 包括渤海、黄海、东海、朝鲜海峡的全部, 日本海和西北太平洋的部分海域。模式水平网格数为 730×438 , 垂向上采用均匀分层, 分为 20 层。并在中国大陆沿海尤其东海进行了水平上加密。从河口至外海分辨率逐渐降低, 长江口附近分辨率最大达到了 1 km, 在东开边界分辨率约 6 km。

模型水深数据来源于两部分, 长江口、杭州湾和苏北浅滩海区使用了精度相对较高的数字化海图数据; 其它海区使用的是分辨率为 $1' \times 1'$ 的 ETOPO1 数据。对这两部分水深数据进行拼接插值到模型各网格点上, 并进行一定的平滑处理。取最小水深为 10 m, 最大水深为 5000 m, 模型计算区域与地形分布如图 1 所示。全场温盐设为固定值, 温度为 15°C , 盐度为 35。

模式的西、北边界设为闭边界, 东、南边界设为开边界。模式自由表面的开边界条件为 Chapman^[13], 外模态的开边界采用 Flather 条件引入潮汐强迫^[14-15]。开边界上的潮汐调和常数采自俄勒冈州立大学的全球潮汐数据库 (<http://volkov.oce.orst.edu/tides/>), 共加入了 13 个分潮 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 M_4 、 MS_4 、 MN_4 、 MM 、 MF)。模式的内模态的时间步长为 120 s, 外模态时间步长为 6 s。模型底摩擦为二次底摩擦项, 底摩擦系数选择对数流速剖面计算方法。不考虑海洋表面强迫和河流输入的影响, 将模型由初始的静止状态开始连续积分, 模拟时间为 2015 年 1 月 1 日至 2015 年 2 月 28 日。

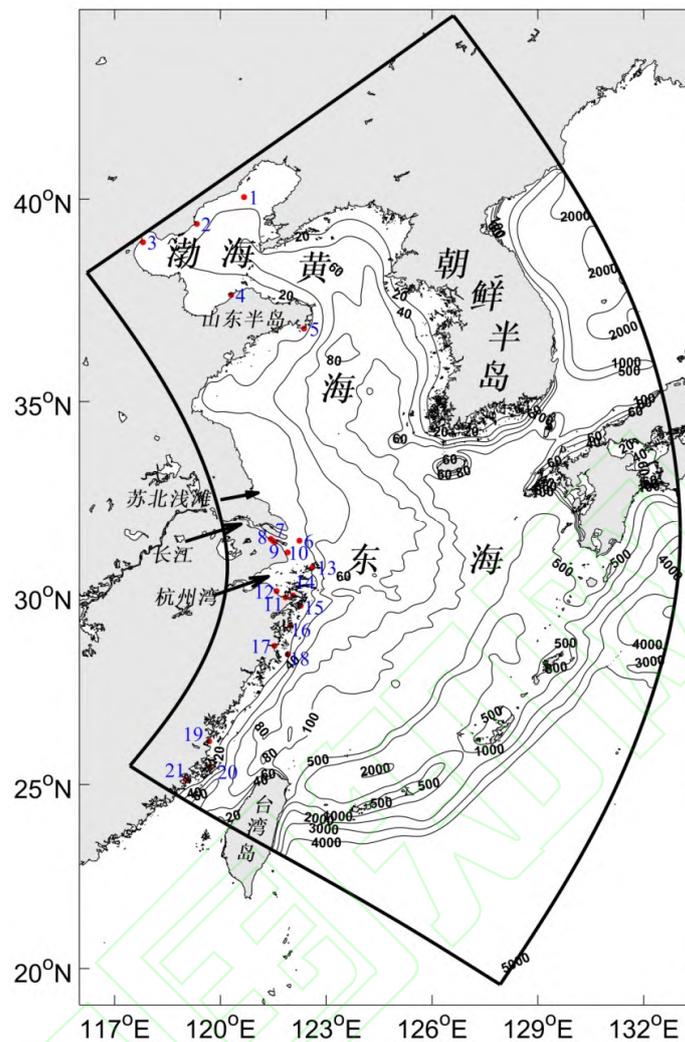


图1 数值模型的计算区域(黑线)、地形(等值线)和验潮站(红点)分布

Fig. 1 Numerical model with the thick black lines showing boundaries of the model domain, the contours showing bottom bathymetry and the red dots showing tidal gauge stations

1.2 模式验证

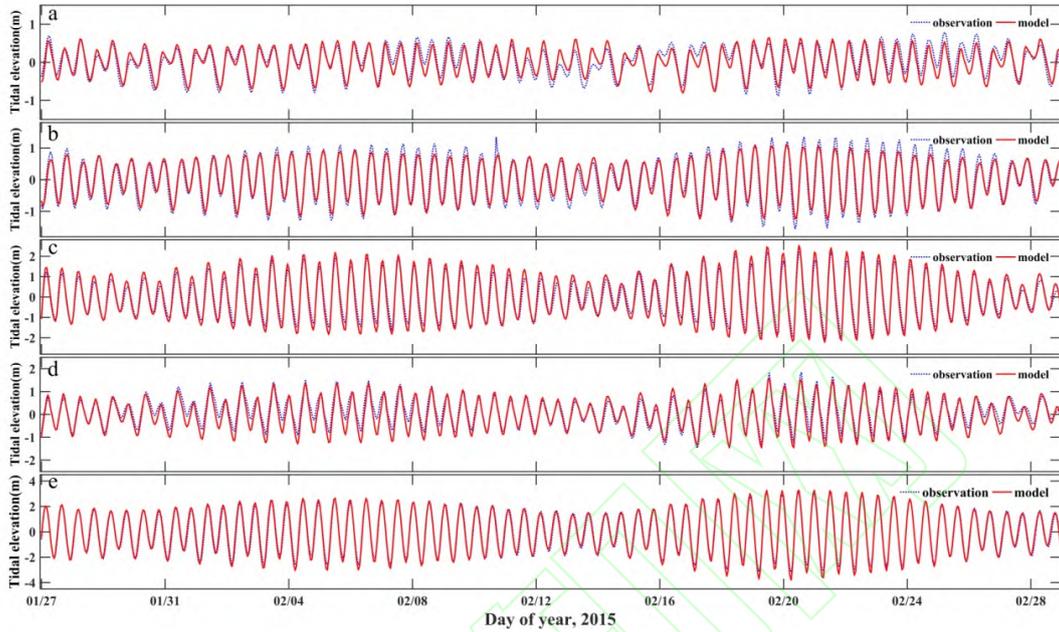
1.2.1 潮汐调和常数

为了验证模型的准确性,本文收集了21个沿岸验潮站(图1)的水位数据。验潮站从北至南,分布在渤海、黄海、东海大部分区域。由于水路网格点与地形存在差异,对于处于网格中陆点上的验潮站,取最接近水点来代替。取模式运行时间(2015年1月1日—2月28日)内的验潮站观测水位数据和模式输出的水位数据,利用T_TIDE进行调和与分析,分别得到4个主要分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 的调和常数。表1为模式结果与验潮站观测数据调和常数的对比。与观测值相比, M_2 、 S_2 、 K_1 和 O_1 分潮振幅的平均绝对误差分别为8.2、4.2、2.5和2.0 cm,迟角绝对平均误差分别为 6.0° 、 7.8° 、 8.1° 和 12.0° 。除渤海湾内分潮的调和常数与观测相差略大一点外,其他拟合程度均良好,可以较好地反映各个分潮的潮汐调和特征。渤海湾海区地形资料不够充分和网格分辨率较低是导致渤海潮汐模拟相对较差的原因。

1.2.2 潮位验证

本文所取的5个验潮站从北向南方向,依次为站点2、5、10、12和19,分别位于渤海、黄海、长江口、杭州湾、台湾海峡中,站点位置如图1所示。验证时间为模式运行的后33 d,即从1月27

日—2月28日。观测和模型潮位的对比结果如图2所示,5个潮位的模型结果与实测结果基本一致,且均方根误差较小,站点2、5、10、12和19的潮位均方根误差分别为0.16,0.17,0.24,0.25和0.22 m,说明模型准确的模拟出了潮位随时间变化特征。



(a) 站点 2; (b) 站点 5; (c) 站点 10; (d) 站点 12; (e) 站点 19。

图2 潮位的观测结果(绿线)与模型结果(红线)对比
Fig.2 Observation (green lines) and model (red line) comparison of tidal elevation at tidal gauges

表1 模式结果与验潮站潮位调和常数的对比
Tab.1 Comparison of tidal constituents of water elevation between observations and model results

站位	M ₂				S ₂				K ₁				O ₁			
	振幅/cm		迟角/°		振幅/cm		迟角/°		振幅/cm		迟角/°		振幅/cm		迟角/°	
	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟	观测	模拟
1	6.3	2.3	291.5	290.5	4.2	1.8	38.8	51.2	28.4	27.0	108.7	110.0	21.4	18.2	59.8	66.3
2	35.9	37.9	12.7	16.5	12.6	12.0	79.0	81.6	27.7	20.3	127.2	131.1	20.9	15.5	74.4	82.1
3	98.3	98.7	73.6	118.7	32.8	29.1	149.7	191.3	34.3	26.1	148.6	163.5	26.0	20.4	94.1	111.5
4	25.7	40.7	315.9	320.6	8.6	12.5	32.7	42.4	20.4	15.6	190.9	218.1	14.5	11.9	134.0	159.7
5	82.2	72.4	48.2	58.5	34.0	28.5	102.9	107.2	23.6	20.3	316.3	321.8	16.8	14.7	266.9	276.4
6	106.8	135.9	316.0	311.8	60.0	63.5	0.4	5.2	22.4	22.1	178.0	199.4	14.0	15.0	133.2	162.6
7	99.5	93.1	16.4	10.9	43.8	40.9	66.4	67.9	19.5	17.8	224.3	234.0	15.1	12.4	176.8	192.5
8	83.3	91.9	34.1	18.3	36.9	39.9	87.4	76.4	16.9	17.4	240.2	237.8	12.1	12.2	192.8	196.3
9	104.9	95.1	8.1	5.2	48.7	42.3	61.0	62.1	21.0	18.1	221.1	231.6	15.5	12.5	166.8	190.5
10	116.5	134.8	331.1	323.4	55.1	62.7	21.8	19.9	22.2	22.7	204.4	209.5	16.6	15.9	162.1	171.7
11	92.6	74.1	318.7	318.5	42.4	32.0	1.5	7.9	30.4	26.9	222.3	229.8	22.3	20.2	175.4	192.5
12	72.1	79.5	352.8	352.7	27.3	33.1	33.9	41.7	26.1	26.8	247.0	235.4	20.7	19.6	198.9	196.0
13	117.1	129.6	283.9	285.1	60.8	59.1	330.0	335.3	25.8	26.6	195.3	203.3	20.4	19.1	158.3	168.2
14	95.6	84.7	290.4	291.4	44.7	36.4	336.0	341.8	28.4	26.8	216.3	224.0	21.2	20.4	175.4	188.9
15	122.4	124.9	259.0	261.5	57.2	54.8	307.2	311.5	29.7	28.0	207.0	212.6	20.3	21.4	163.9	177.9
16	148.9	146.3	248.8	255.6	69.8	62.8	298.3	304.6	29.9	28.8	213.6	215.1	23.3	22.6	171.3	181.6
17	164.9	169.5	262.7	259.3	68.1	71.1	319.1	307.4	27.7	29.5	229.7	221.1	21.0	23.5	192.2	188.6
18	152.7	152.9	246.9	247.3	66.6	63.2	292.0	292.0	30.1	29.0	217.6	215.4	22.2	23.1	174.9	182.4
19	201.7	209.5	305.7	301.7	69.4	75.6	351.0	350.5	29.5	31.4	244.1	244.1	21.8	25.7	203.2	208.8
20	216.6	217.9	314.4	320.0	72.4	77.6	356.2	11.4	34.7	31.7	250.7	257.9	26.2	26.4	208.9	219.9
21	223.9	223.2	332.5	333.5	72.3	79.3	17.7	27.6	37.0	33.0	278.0	270.0	27.8	27.3	221.8	229.4
平均绝对误差	8.2 cm		6.0°		4.7 cm		7.8°		2.5 cm		8.1°		2.0 cm		12.0°	

1.2.3 潮汐特征

东中国海的潮波主要来自于太平洋潮波经台湾和九州之间的水道传入的谐振潮^[16]。太平洋潮波传入后，大部分以前进波的形式通过东海传向黄海和渤海。东中国海地形近似半封闭宽海湾，由于地形和地转效应的影响，在东中国海内形成逆时针旋转的潮波系统。等潮时线绕无潮点逆时针偏转，潮差有岸边大，中间小的特征。

图 3 是本文模拟得到的 4 个主要分潮 (M_2 、 K_1 、 S_1 、 O_1) 的等振幅线和等迟角线分布，与前人实测^[17]和模型结果^[11, 17-18]相比，无潮点位置、等振幅线和等迟角线分布结果基本一致，表明本文模型结果较好地反映出潮波在东中国海的分布特征。因湾顶反射与地转效应，半日分潮在渤海的秦皇岛和黄河口附近海域、黄海的威海附近海域和黄海中部青岛附近海域形成无潮点，同时在台湾北部附近存在一个退化的半日分潮无潮点；全日分潮在渤海海峡西部和黄海中部海域形成无潮点。渤海潮差（这里和下文所述的潮差为总潮差）大多为 2~3 m，辽东湾顶和渤海湾顶的潮差相对较大。黄海潮差一般是海区中部小而近岸大，东岸普遍大于西岸。最大潮差海区出现在朝鲜半岛的西侧，潮差一般为 4~8 m，中国大陆沿岸潮差一般为 2~4 m。东海则与黄海相反，潮差具有西岸大，东岸小的特征。琉球群岛的潮差小，约为 1 m，杭州湾和闽浙沿海的潮差普遍较大，最大潮差可达 8 m 以上^[16]。

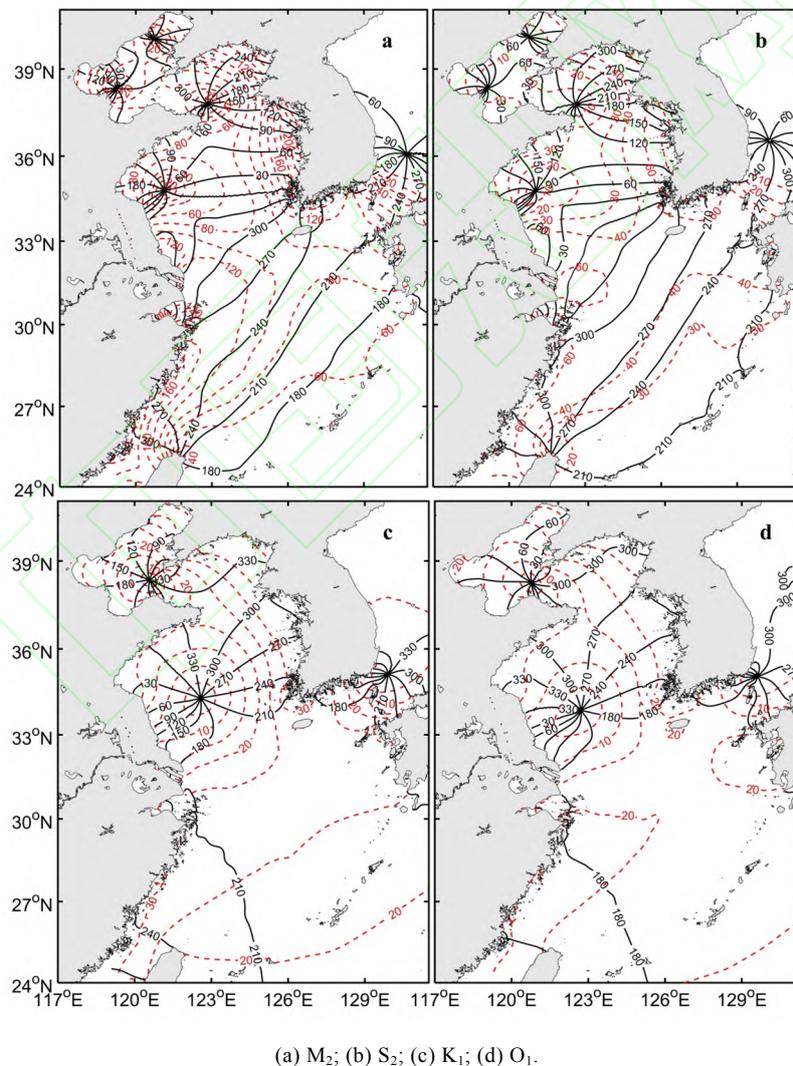


图 3 4 个主要分潮等振幅线（单位 cm，虚线所示）和等迟角线（单位°，实线所示）分布
Fig. 3 Model predicted co-amplitude (in units of cm, dashed lines) and co-phase (in unites of degree, solid lines) for four principal tidal constituents

1.3 潮能平衡计算方法

根据能量守恒定律, 在平均潮周期内, 通过任一海域的水平方向的净潮能与该海域的潮能耗散总量相平衡。将能量方程对自由表面 s 所包围的控制体积 V 积分, 并取潮平均可得到能量平衡计算方程^[19, 20]。

$$\begin{aligned} & \iint \left\langle \left(p + \rho_0 \frac{u^2 + v^2}{2} \right) \vec{u} \cdot \vec{n} \right\rangle ds \\ &= \iiint \rho_0 \left\langle \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(uk_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(vk_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - k_v \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\rangle dV + Diss_h \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p 代表正压潮相关的压力, ρ_0 代表海水密度, 本文取 1025 kg/m^3 ; u 、 v 代表潮流东、北方向速度; \vec{u} 代表潮流深度平均速度矢量; \vec{n} 代表海域边界的法线方向的单位矢量; k_v 是垂向涡动粘滞系数; 括号 $\langle \rangle$ 表示一个分潮周期的平均。公式等号左边代表潮周期平均通过任一海域的水平方向的净潮能, 等号右边代表潮周期平均的该海域的潮能耗散总量。潮能耗散有三部分组成, 分别由公式右侧三项代表: 第一项为底摩擦耗散, 第二项为垂向混合耗散, 第三项 $Diss_h$ 代表水平扩散耗散。

由于潮能通量中的对流项 (公式等号左边的第二部分) 通常比正压项对能量通量的贡献小两个数量级, 因此可以忽略。如果只考虑由正压潮汐运动所产生的压力做功, 单位时间内通过单位宽度水柱的潮能通量可以进一步简化为^[21]:

$$\begin{aligned} W_x &= \rho_0 gh \langle u \zeta \rangle = \frac{1}{2} \rho_0 gh HU \cos(\varphi_u - \varphi_\zeta) \\ W_y &= \rho_0 gh \langle v \zeta \rangle = \frac{1}{2} \rho_0 gh HV \cos(\varphi_v - \varphi_\zeta) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: W_x 、 W_y 分别为潮能通量在东西 (x)、南北 (y) 方向上的分量; g 为重力加速度 (取 9.8 m/s^2); h 为水深; u 、 v 为正东和正北方向的深度平均流; ζ 为潮位; H 、 U 、 V 分别为分潮振幅及分潮流东、北分量的振幅; φ_ζ 、 φ_u 、 φ_v 分别为分潮潮位及潮流东、北分量的相位。底摩擦耗散可以进一步简化为:

$$\iiint \rho_0 \left\langle \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(uK_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(vK_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] \right\rangle dV = \iint \langle \vec{u}_s \cdot \vec{\tau}_s - \vec{u}_b \cdot \vec{\tau}_b \rangle dS \quad (3)$$

式中, \vec{u}_s 、 \vec{u}_b 分别为海表和海底的流速, $\vec{\tau}_s$ 、 $\vec{\tau}_b$ 分别为海表和海底的切应力。由于自由表面没加风场, $\vec{\tau}_s$ 值为 0, 海底的流速和切应力都取模型输出的结果。该项一般代表潮能在底部对数层湍动能底耗散。对每一个网格的水点自海底到海表进行垂向积分并在时间上进行平均, 垂向混合引起的潮能耗散可进一步简化为:

$$\begin{aligned}
& -\iiint \rho_0 \left\langle K_V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \right\rangle dV \\
& = -\iint \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \rho_0 \int_{-h}^{\eta} K_V \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] dz dt \right\} dS
\end{aligned} \tag{4}$$

式中, η 为自由海表面高度, T 为潮平均的时间 (取 58 d)。水平扩散项引起的潮能耗散的计算方式与垂向扩散耗散相似。

$$Diss_h = -\iint \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \rho_0 \int_{-h}^{\eta} K_H \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] dz dt \right\} dS \tag{5}$$

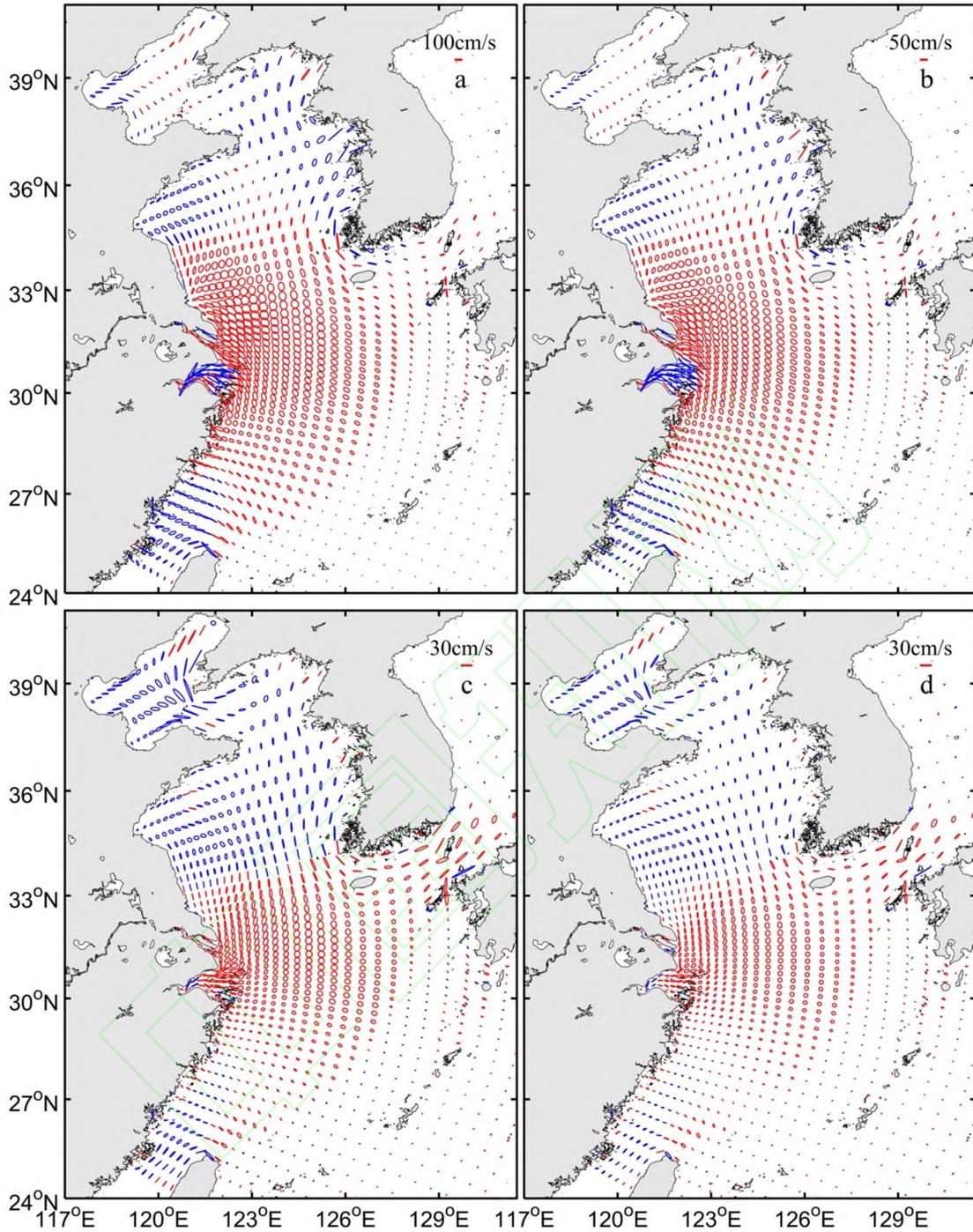
式中, K_H 是水平向涡动粘滞系数。

2 结果与讨论

2.1 潮流特征

将模型输出的流场数据进行调和分析, 得到 4 个主要分潮 (M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1) 的深度平均潮流椭圆分布 (图 4)。在渤海, 全日潮流 (以 K_1 和 O_1 为代表) 以逆时针方向旋转为主, 仅在辽东湾顶等海域顺时针旋转, 而半日潮流 (以 M_2 和 S_2 为代表) 在渤海呈现出中部顺时针, 两端逆时针旋转的分布特征, 其中渤海海峡也主要呈现顺时针方向旋转; 在黄海, 绝大部分海区的全日潮流逆时针方向旋转, 半日潮流也仅在南黄海南部等海区呈顺时针方向旋转; 在东海, 主要海区半日潮流和全日潮流都以顺时针方向旋转, 仅在浙江、福建沿岸部分海域半日潮流和全日潮流呈逆时针方向旋转。潮流椭圆分布特征与朱学明等^[11]研究结果一致。

东中国海以半日潮为主^[16], 从图 4 可见, 半日潮流的整体量级要大于全日潮流。渤海的潮流流速一般为 0.5~1.0 m/s, 老铁山水道附近和辽东湾附近的潮流相对较大。渤海存在 3 个明显的弱流区, 分别位于烟台-威海附近、莱州湾东南部以及秦皇岛和滦河口一带^[22]。黄海的潮流流速一般东部大于西部, 朝鲜半岛西岸为强潮流区, 最大流速可达 4.0 m/s 以上。东海的潮流流速近岸大而远岸小, 长江口、杭州湾、舟山群岛附近为中国沿岸潮流最强区, 可达到 3.0~3.5 m/s。



(a) M_2 ; (b) S_2 ; (c) K_1 ; (d) O_1 . 红色表示顺时针旋转, 蓝色表示逆时针旋转。

图 4 4 个主要分潮深度平均潮流椭圆分布

Fig. 4 Model predicted depth-averaged tidal current ellipses for four major tidal constituents

2.2 潮能通量

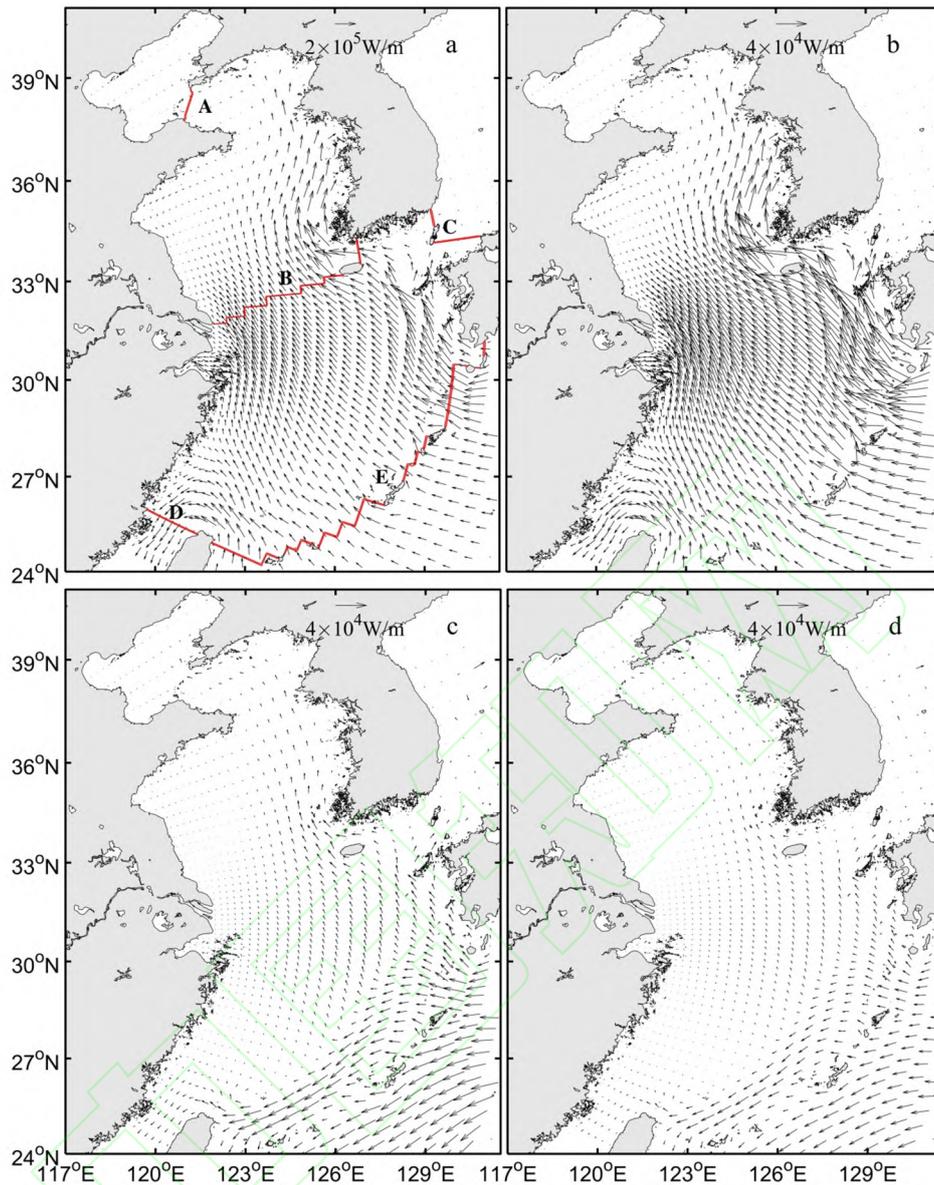
据模式输出结果计算得到的 4 个主要分潮潮能通量的分布如图 5 所示。东中国海的能量主要来自于西太平洋, 以 M_2 和 S_2 为代表的半日潮能通量, 自太平洋穿越第一岛链沿西北向传入东海后, 主体一直传播至浙江沿岸, 并有东北向分支传入黄、渤海, 西南向分支流入台湾海峡; 能量较大的西侧半日潮波则由吐噶喇海峡传入东海, 并沿日本西海岸北上到达济州岛海域, 这时绝大多数能量自济州岛

西海岸传入济州岛海峡，与自东海传入黄海的分支汇合最终流入黄、渤海，而小部分能量向西经过朝鲜海峡传入日本海；同时，在台湾岛西侧存在一支逆时针绕台湾岛流入台湾海峡的半日潮通量。以 K_1 和 O_1 为代表的全日分潮的潮能通量，则受到第一岛链的阻挡，只有极少部分能量传入东海；绝大部分全日潮能通量都主要沿西南方向传播，直接或者经由台湾海峡向南海方向汇去。

由于半日潮和全日潮潮能通量主体传播方向不同，使得 M_2 和 S_2 分潮潮能通量在东海、黄海区域明显大于 K_1 和 O_1 分潮， M_2 最大可达 3.5×10^5 W/m， S_2 最大可达 1.2×10^5 W/m；而在第一岛链以南水深较大的海域， M_2 和 S_2 分潮能通量与 K_1 和 O_1 分潮相当，并且全日潮能通量第一岛链以南海区明显大于以北海区，与前人的研究^[11]结论一致。

第一岛链的存在对潮能通量的空间分布有着很大的影响。但总的来说，由于海区地形的变化，单位宽度潮能通量的沿程变化规律与水深变化基本相同。特殊地形，如济州岛的存在，使其与朝鲜半岛西南端形成水道相对较窄的海峡，通过海峡的潮能通量强度相对较大。

为了更细致地研究渤海、黄海、东海各海区的潮能通量收支和潮能耗散的分布特征，在模式计算区域截取了 A、B、C、D、E 共 5 条断面（图 5(a)），将模拟区域大致分割为渤海海区、黄海海区和东海海区。依式（2）将各分潮潮能通量在断面上积分得出通过 5 条断面的潮能通量。4 个主要分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 经过断面 E 进入东海的潮能通量分别为 159.684, 33.857, 7.567, 4.617 GW，其中 M_2 分潮的潮能通量和赵保仁等^[9]的结果（157 GW）基本一致，与朱学明等^[11]（118.341, 19.525, 5.630, 3.871 GW）和李培良等^[10]（122.499, 20.870, 10.165, 7.419 GW）结果相比， M_2 、 S_2 较大， K_1 、 O_1 分潮的潮能通量介于二者之间，与朱学明等^[11]的结果较为接近。由 D 断面流入台湾海峡的分潮潮能通量分别为 14.270, 1.929, 0.787, 0.356 GW，C 断面流出东海的分潮潮能通量分别为 0.767, 0.292, 0.396, 0.361 GW。进入东海的潮能通量主要由太平洋经第一岛链传入，并从台湾海峡和朝鲜海峡流出，朝鲜海峡流出的潮能通量相对较小。由东海经 B 断面流入黄海的潮能通量分别为 77.838, 16.132, 2.817, 1.447 GW，与朱学明等^[11]结果（67.568, 11.726, 3.063, 1.623 GW）相比，半日分潮的潮能通量略微偏大，全日分潮潮能通量基本一致。由黄海经 A 断面流入渤海的潮能通量分别为 1.456, 0.143, 0.366, 0.187 GW，与朱学明等^[11]结果（1.989, 0.173, 0.540, 0.256 GW）相差不大。依计算结果可知，流入渤海的潮能量级相对较小，仅为东中国海的 1.2%，黄海和东海分别为 51.5%和 47.3%。



(a) M_2 ; (b) S_2 ; (c) K_1 ; (d) O_1 . (a) 中红线代表计算潮能通量的断面。

图 5 4 个主要分潮的潮能通量分布

Fig. 5 Tidal energy fluxes vectors for four major tidal constituents

2.3 潮能耗散

东中国海总潮能耗散和各分量见图 6 所示。垂向混合耗散(图 6(c))除了在量级上要小于底摩擦耗散(图 6(b))外,两者分布特征相似。水平扩散耗散(图 6(d))量级相对要小得多。结合总潮能耗散分布图(图 6(a)),东中国海单位面积潮能耗散的总体特征为沿岸区域较高,在离岸海域,由于地形逐渐开阔,水深增大,半日潮流流速相对减小,因此单位面积耗散相对减小。

高潮能耗散区一般水深较浅,半日分潮潮流速度相对较大。主要分布在朝鲜半岛沿岸和浙闽沿岸、江苏北部和长江口外侧海域以及杭州湾海域。朝鲜半岛沿岸和浙闽沿岸海域都具有众多的岛屿,复杂的地形和急剧变化的岸线所形成的尖锐岬角是导致高耗散的原因。Signell 等^[23]和 Zhong 等^[20]研究指出:沿岸水深较浅,在底部摩擦效应的影响下,潮流与岬角的相互作用产生强烈的湍流漩涡并导致高能量耗散。同样,渤海湾黄河口、成山角和台湾岛北部等岸线急剧变化的岬角海域容易形成高能

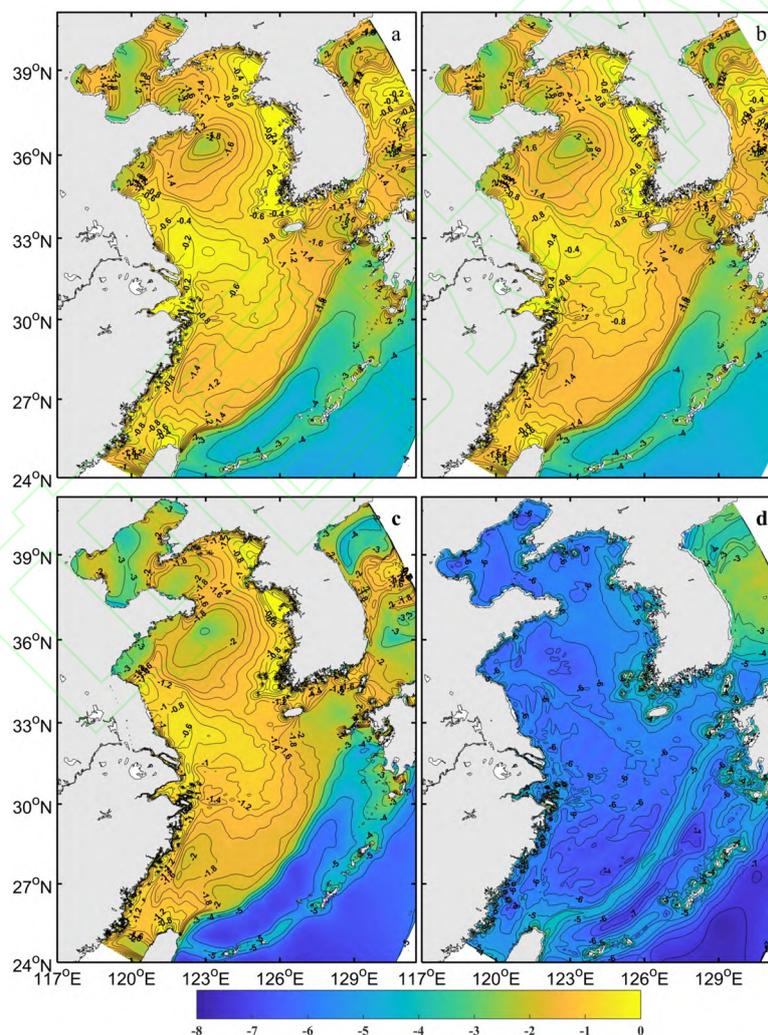
耗区。

江苏北部沿岸海域和长江口外侧海域分别存在巨大的辐射状沙脊群和水下三角洲浅滩。潮流传播在此受阻，并与沙脊群和 underwater 三角洲浅滩相互作用产生强湍流是潮能巨大耗散的原因。潮流沙脊是潮流作用形成的线状沙体，沙脊多由砂质沉积物构成^[24]，潮能在此耗散塑造形成潮流脊，沙脊的存在和发展反过来耗散掉传播至此的潮能^[25]，这造成了苏北潮流沙脊群是黄海西海岸潮流耗散最强的地区。长江口现代水下三角洲主要由粘土和粉砂级沉积物组成，并由河口向海呈现较为明显的粒径细化趋势^[26-27]。沉积物粒径最大的前缘斜坡区（31.3°~31.4° N，122.1°~122.3° E）以粘土质砂和细砂为主，这一区域内的潮能耗散也较强（图 5(a)），与沉积物分布相一致。

杭州湾潮流作用非常强，海底地貌类型复杂，水动力在宏观上具有“北进南出”的特征^[28]。舟山群岛对潮流的阻隔效应、杭州湾喇叭形态的约束作用等因素造成潮能的巨大耗

散，粉砂为主的粗颗粒底质和高悬沙浓度^[29-30]也进一步表明潮能在此有很强的湍流耗散。

低耗散区一般水深相对较大，半日分潮潮流速度相对较小，主要分布在渤海中部莱州湾至秦皇岛一线的海域、北黄海西南部海域、南黄海以 123° E，36.5° N 为中呈圆形分布海域。这些区域的海底沉积物以泥质为主^[31]，潮流流速较弱，无法启动泥沙的悬浮运输，有利于细颗粒泥沙的沉积。



(a) 总耗散；(b) 底摩擦耗散；(c) 垂向扩散耗散；(d) 水平扩散耗散。数值取 10 为底的对数，单位为 $W \cdot m^{-2}$ 。

图 6 东中国海潮能耗散分布
Fig. 6 Distributions of tidal dissipation rate in the East China Seas

渤、黄、东海 3 个海区的潮能耗散可依照图 5(a)的断面计算得出(表 2)。这 3 个海区的总潮能约为 186.628 GW, 总耗散约为 176.239 GW, 底摩擦耗散约为 118.180 GW, 垂向扩散耗散约为 58.041 GW, 水平向扩散耗散约为 0.018 GW。总耗散约为总潮能的 94.4%, 其中底摩擦耗散占总耗散的 67.1%, 垂向扩散耗散占总耗散 32.9%, 水平扩散耗散约为总耗散的万分之一。Wu 等^[32]运用双向嵌套 ROMS 模式, 对舟山群岛海域进行了高分辨率的数值模拟, 得到底摩擦耗散占潮能总耗散的比值为 67.3%, 本文计算的整个东中国海区域的比值 67.1%, 两者相近, 这也进一步肯定了本文数值模型的可靠性。由此可见, 底摩擦耗散和垂向扩散耗散是东中国海的潮能耗散的主要方式, 水平扩散耗散与其余两项相比可以忽略。黄海的潮能耗散最大, 占东中国海总耗散的 54.0%, 其底摩擦耗散、垂向扩散耗散和水平项扩散耗散分别为 61.509, 33.740 和 0.005 GW, 耗散相对潮能占比也最大达到了 99%以上。其次是东海, 潮能耗散总量为东中国海总耗散的 44.9%左右, 其底摩擦耗散和垂向扩散耗散相比黄海较小, 分别为 55.304 和 23.852 GW, 水平向扩散耗散相对较大为 0.012 GW, 耗散相对潮能占比约为 90%。渤海的潮能耗散最小, 仅占到东中国海总耗散的 1.0%, 底摩擦耗散、垂向扩散耗散和水平项扩散耗散分别为 1.367, 0.422 和 0.0005 GW, 耗散相对潮能占比为 83.2%。渤、黄、东海各海区的潮能耗散量值接近却略小于净潮能量值, 也进一步说明潮能耗散计算合理。

表2 渤、黄、东海的潮能与耗散
Tab.2 Tidal energy and dissipation rate in the Bohai, Yellow, and East China Seas

海区	潮能	底摩擦耗散	垂向扩散耗散	水平向扩散耗散
渤海(断面 A)	2.152	1.367	0.422	0.0005
黄海(断面 B-A)	96.082	61.509	33.740	0.005
东海(断面 C+D+E-B)	88.333	55.304	23.852	0.012
总计	186.567	118.180	58.041	0.018

3 结论

本文运用 ROMS 建立了覆盖渤海、黄海、东海及其周边海域的三维非线性的正压模式, 计算了东中国海的潮能通量和耗散。主要结论如下:

1) 东中国海的潮波系统主要由通过第一岛链自西太平洋传入的潮能所维持, 其中半日分潮能占绝对优势, 全日分潮的潮能通量由于受到第一岛链的阻挡, 只有极少部分能量传入东中国海。

2) 东中国海高潮能耗散区分布在朝鲜半岛沿岸、苏北浅滩、长江水下三角洲和杭州湾海域, 其中苏北浅滩是黄海西部潮能耗散最强的地区。低耗散区分布在渤海中部、北黄海西南部和南黄海中部。潮能耗分布与海底沉积物类型对应良好, 高耗散区海底沉积物为粗颗粒物, 而低耗散区海底为细颗粒沉积物。

3) 传入东海、黄海、渤海的净潮能约为 88.333 GW、96.082 GW、2.152 GW, 其耗散约为 79.168 GW、95.254 GW、1.90 GW。底摩擦耗散和垂向扩散耗散是潮能的主要耗散形式。其中底摩擦耗散和垂向混合耗散分别占总耗散的 67.1%和 32.9%, 水平项扩散耗散量级较小, 可忽略不计。

相对于已有的东中国海的研究仅分析了潮能耗散的底摩擦分量, 本文通过计算潮能耗散率的 3 个分量, 发现在东中国海, 垂向混合耗散也是潮能耗散的主要方式之一。根据潮能耗散的空间分布, 本文归纳出东中国海的高潮能耗散与低潮能耗散区, 并得出了潮能耗散率与研究海区岸线、地形和底质类型的相关关系。

参考文献:

- [1] MUNK W, WUNSCH C, ABYSSAL RECIPES I I. Energetics of tidal and wind mixing[J]. Deep-Sea Research I, 1998, 45(12): 1977-2010.
- [2] JEFFREYS H J. Tidal friction in Shallow Seas[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A, 1921, 221: 239-264.
- [3] ARGOTE M L, AMADOR A, LAVIN M F, et al. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1995, 100(C8): 16103-16118.
- [4] FOREMAN M G G, SUTHERLAND G, CUMMINS P F. M₂ tidal dissipation around Vancouver Island: an inverse approach[J]. Continental Shelf Research, 2004, 24(18): 2167-2185.
- [5] TINIS S W, POND S. Tidal energy dissipation at the sill of Sechart Inlet, British Columbia[J]. Journal of Physical Oceanography, 2000, 31(31): 3365-3373.

- [6] 倪培桐, 韦惺, 吴超羽, 等. 珠江河口潮能通量与耗散[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 67-75.
- [7] 方国洪. 黄海潮能的消耗[J]. 海洋与湖沼, 1979, 10(3): 200-213.
- [8] 张占海, 吴辉碁. 渤海潮汐和潮流数值计算[J]. 海洋预报, 1994, 11(1): 48-54.
- [9] 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(中文版), 1994, 16(5): 1-10.
- [10] 李培良, 李磊, 左军成, 等. 渤黄东海潮能通量与潮能耗散[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2005, 35(5): 713-718.
- [11] 朱学明, 刘桂梅. 渤海、黄海、东海潮流、潮能通量与耗散的数值模拟研究[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 669-677.
- [12] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [13] CHAPMAN D C. Numerical treatment of cross-shelf open boundaries in a barotropic coastal ocean Model[J]. Journal of Physical Oceanography, 1985, 15(8): 1060-1075.
- [14] MARCHESIELLO P, MCWILLIAMS J C, SHCHEPETKIN A J. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models[J]. Ocean Modelling, 2001, 3(1/2): 1-20.
- [15] CARTER G S, MERRIFIELD M A. Open boundary conditions for regional tidal simulations[J]. Ocean Modelling, 2007, 18(3/4): 194-209.
- [16] 沈育疆. 东中国海潮汐数值计算[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1980(3): 26-35.
- [17] LI M, RONG Z. Effects of tides on freshwater and volume transports in the Changjiang River plume[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2012, 117: C06027.
- [18] 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.
- [19] Gill A. E. Atmosphere-ocean dynamics[M]. London: Academic Press, 1982, 31(3): 345-346.
- [20] ZHONG L, LI M. Tidal energy fluxes and dissipation in the Chesapeake Bay[J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(6): 752-770.
- [21] 佟景全, 雷方辉, 毛庆文, 等. 不考虑局地引潮势的南海正压潮能通量与潮能耗散[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(3): 1-9.
- [22] 修日晨, 李繁华, 孔祥德. 渤海及北黄海潮流场的基本特征[J]. 海洋科学, 1989, 13(5): 1-7.
- [23] SIGNELL R P, ROCKWELL G W. Transient eddy formation around headlands[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1991, 96(C2): 2561-2575.
- [24] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 15-25.
- [25] 刘博. 辐射沙脊群研究综述[J]. 中国水运, 2017, 17(7): 379-380.
- [26] 庄克琳, 毕世普, 刘振夏, 等. 长江水下三角洲的动力沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 1-9.
- [27] 陈静, 赵宝成, 战庆. 长江口水下三角洲北部近百年沉积物粒度组成及其对水动力环境的响应[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 692-699.
- [28] SU J, WANG K. Changjiang river plume and suspended sediment transport in Hangzhou Bay[J]. Continental Shelf Research, 1989, 9(1): 93-111.
- [29] 谢东风, 高抒, 潘存鸿, 等. 杭州湾沉积物宏观输运的数值模拟[J]. 泥沙研究, 2012, (3): 51-56.
- [30] 韩曾萃, 戴泽衡, 李光炳. 钱塘江河口治理开发[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 459.
- [31] 董礼先, 苏纪兰, 王康增. 黄渤海潮流场及其与沉积物搬运的关系[J]. 海洋学报(中文版), 1989, 11(1): 102-114.
- [32] Wu R H, Jiang Z T, Li C Y. Revisiting the tidal dynamics in the complex Zhoushan Archipelago waters: a numerical experiment[J]. Ocean Modelling, 2018, 132: 139-156.