

基于三维水动力海洋数值模型的莫桑比克海峡潮汐数值模拟

殷琪, 徐博轩, 秦志浩, 黄岱颖, 胡松*

(上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

摘要: 莫桑比克海峡是世界上最长的海峡, 具有独特的潮波动力学特征。基于三维水动力海洋数值模型(FVCOM)模拟莫桑比克海峡的潮汐动力过程, 通过设置不同底摩擦、海岭形态、岸线特征进行数值试验, 对模型结果进行对比验证。结果表明: 莫桑比克海峡及其邻近海区的潮波系统以半日分潮 M_2 和 S_2 为主, 最大潮流能出现在莫桑比克海峡最窄处。对潮能通量影响最大的因素是莫桑比克海峡北部喇叭形岸线的束窄效应, 海岭附近的地形深度和位置可小幅度调制潮能通量, 而海底粗糙程度对潮能通量的影响几乎可以忽略。

关键词: 莫桑比克海峡; 潮汐数值模拟; FVCOM; 潮能通量

中图分类号: P731.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)03-0020-11

0 引言

莫桑比克海峡位于非洲大陆和马达加斯加岛之间(见图1), 全长1 670 km, 约为库克海峡^[1]的8倍。莫桑比克海峡中部窄北部宽, 北端最宽处约为960 km, 中部最窄处约为386 km, 平均宽度约为450 km^[2]。作为世界上最长的海峡, 其大部分水深超过1 000 m, 最深处约3 533 m。莫桑比克海峡作为西南印度洋的重要水道, 其南部分布有Eparses群岛与莫桑比克盆地, 中北部紧邻Davie海岭等众多海脊、海山, 东西两侧分别受马达加斯加岛基岩岸线与非洲大陆莫桑比克陆架的阻挡, 海峡及其周边海域的地形分布较为复杂^[2]。总体上, 莫桑比克海峡水域的水深由北至南呈现出深—浅—深的分布特征, 地貌类型丰富, 地形梯度变化剧烈。

潮能通量指单位时间通过自海底至海面单位宽度断面的潮能^[3]。朱学明等^[4]基于区域海洋模型系统(Regional Ocean Modeling System, ROMS)得出太平洋传入渤海、黄海、东海的4个主要分潮的潮

能有50%以上在南黄海耗散, 30%~40%在东海耗散, 渤海潮能耗散最小; 张学庆等^[5]基于三维水动力海洋数值模型(Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM)研究了在潮-径相互作用下大辽河口的潮能通量分布与沿程变化特征, 得出河道形态是决定河口能量分布和耗散的重要因素, 深槽和河道断面狭窄处为高能通量集中区, 河口附近潮滩和上游河段为低能通量集中区; 李培良等^[6]利用同化高度计资料和沿岸验潮站资料对潮汐数值模式进行同化, 得出从太平洋进入渤黄东海的潮能以 M_2 为主, M_2 分潮的能量在渤黄东海具有支配作用。Egbert等^[7]的研究表明全球海域潮能耗散与地形和底摩擦密切相关, 潮能通量分布特征变化复杂。考虑到海底地形对底摩擦耗散具有直接影响, 莫桑比克海峡及邻近海域的复杂地形可能是影响该区域水动力过程及海水能量变化的根本因素之一。

Chevane等^[8]基于ROMS分析了莫桑比克中部索法拉滩的潮汐特征, 该区域拥有西印度洋最大的潮汐, 以 M_2 分潮占主导地位, 振幅高值出现在海岸

收稿日期: 2025-08-15。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC3101702)。

作者简介: 殷琪(2004-), 女, 本科在读, 主要从事近海海洋动力学方面研究。E-mail: 3166558067@qq.com

*通信作者: 胡松(1978-), 男, 教授, 博士, 主要从事近海海洋动力学方面研究。E-mail: shu@shou.edu.cn

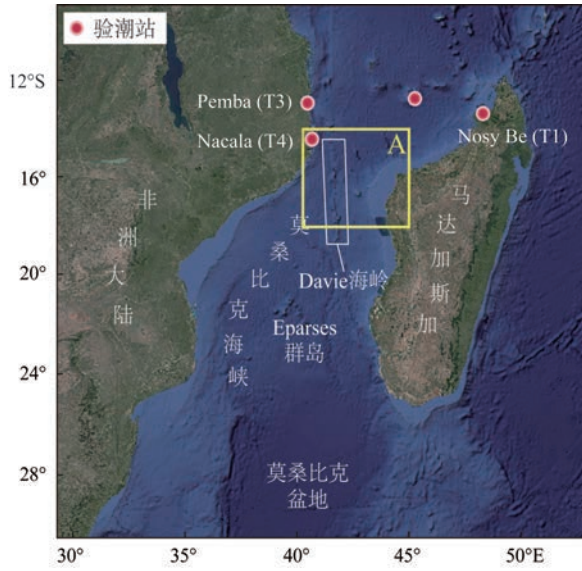


图1 验潮站位置及研究区域示意图

Fig.1 Map of tide gauges and the study area

附近。Canhanga等^[9]对莫桑比克南部马普托湾的潮汐特征进行了研究,得出该地以 M_2 和 S_2 分潮为主,且在海湾中部和通道处潮能达到最大值。多数研究表明莫桑比克海峡及其邻近海区的潮波主要以半日分潮为主,全日分潮可忽略不计。张华等^[10]针对莫桑比克海峡及邻近海区的潮能通量和潮能耗散开展了相关研究,获得了对该海区潮能通量和底摩擦耗散等特征的基本认识。以往的研究注重分析该区域的潮汐特征,得到了潮能通量的空间分布规律,但缺少对潮能通量空间分布形成机制的探讨,例如潮能通量最大值为何出现在Davie海岭附近、潮能通量空间分布主要受到哪些因素控制等问题,尚未开展深入研究。

近年来FVCOM模式在中国近海得到了广泛应用^[11-13]。该模式采用有限体积法,能够严格保证通量守恒,尤其适用于海峡区域,目前已经在马六甲海峡^[14]、布兰斯菲尔德海峡^[15]、库克海峡^[1]等区域得到了应用。因此,本研究基于FVCOM模式,在保证控制试验模拟结果和潮汐分量观测结果相吻合的前提下,设计一系列数值试验,比较控制潮能通量分布的主控因子,重点研究地形、岸线、底摩擦对潮能通量的影响。莫桑比克海峡地形特殊、水深较大,本研究对于深入了解这种特定海峡通道的潮汐特征和动力学因子有一定的参考价值。

1 模型构建与实验设计

1.1 模型介绍

考虑到莫桑比克海峡及其周边海域的地形分布较为复杂,本文选用麻省大学开发的三维水动力模型FVCOM^[16],该模型具备并行计算功能^[17]。非结构网格可以更好地拟合岸线,有限体积法可严格保证物质与体积守恒性^[15,18]。FVCOM作为三维水动力模型,其控制方程由动量方程、连续方程、温度方程、盐度方程和密度方程组成。

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (p_H + p_0)}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (p_H + p_0)}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial q}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_w \quad (4)$$

温度方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F_T \quad (5)$$

盐度方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S \quad (6)$$

密度方程:

$$\rho = \rho(T, S) \quad (7)$$

式中: x, y, z 分别代表笛卡尔坐标系下的东、北和垂直坐标轴; u, v, w 分别表示 x, y, z 方向的速度分量; T 为位温; S 为盐度; ρ 为海水密度; p_H 为静水压强; p_0 为海表面大气压强; f 为科氏参量; g 为重力加速度; K_m 为垂直涡粘性系数; K_h 为热量垂直涡旋扩散系数; F_u, F_v, F_T 和 F_S 代表水平动量,水平热量和水平盐度的扩散项; F_w 为垂向动能扩散项。

本文使用的潮能通量计算公式^[4]:

$$E = \frac{1}{2} \rho g H A_{\zeta} A_{u,v} \cos(\delta_{\zeta} - \delta_{u,v}) \quad (8)$$

式中: E 代表潮能通量; A_{ζ} 代表潮汐振幅; δ_{ζ} 代表潮汐迟角; $A_{u,v}$ 代表深度平均的潮流椭圆长半轴; $\delta_{u,v}$ 表示深度平均的潮流椭圆的迟角; H 代表水深; ρ 表示海水密度; g 表示重力加速度。

模型中所使用的底摩擦系数计算公式为^[19]:

$$C_d = \max \left[\frac{k^2}{\ln \left(\frac{Z_{ab}}{Z_0} \right)^2}, 0.0025 \right] \quad (9)$$

式中: k 为 von Kármán 常数, 取值 0.4; Z_0 是海底粗糙程度; Z_{ab} 是海底与距离海底最近的 σ 层之间的距离, C_d 表示底摩擦系数。

1.2 模型设置

模型计算范围位于 $10^{\circ} \sim 31^{\circ} \text{S}$, $32^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{E}$ 区域内 (见图 2a)。模型网格由 Surface Water Modeling System (SMS) 软件生成。为了更精细地拟合该区域的地形, 准确反映该区域的水动力过程, 对岛屿附近的网格进行加密。整个计算海域共有 10 590 个网格节点, 20 576 个三角形单元, 开边界分辨率约为 13 km, 设置了 100 个节点, 最小网格精度约为 1 km。模型计算的外模时间步长设置为 5 s, 内模时间步长与外模时间步长之比设置为 10, 垂向 σ 层设为 21 层。模型为正压模型, 不考虑温盐场变化,

开启干湿判别模块, 底摩擦采用默认设置, 即底摩擦系数为 0.002 5。

本文网格岸线采用美国国家海洋与大气管理局提供的全球高分辨率海岸线 (A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database, GSHHG)^[20] 数据) 网址: <http://www.soest.hawaii.edu/wessel/gshhg/>。模型水深数据采用全球水深地形模型 (Earth topography, 1 arc-minute, ETOPO1) 插值得到。开边界水位强迫由俄勒冈州立大学 (OSU) 的全球潮汐模型 TPXO7.2 计算得出, 主要包括 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 K_2 、 P_1 、 Q_1 共 8 个主要分潮。模型计算时间为 2021 年 8 月 1 日—10 月 31 日。模型采用冷启动, 为避免冷启动产生的初始振荡, 将前 10 天作为模式稳定期。本文使用 2021 年 8 月 11 日—10 月 31 日的计算结果进行分析。

1.3 试验方案

为研究莫桑比克海峡地形和岸线对潮能通量的影响机制, 本文共设计 4 组试验 (见表 1)。控制试验采用模型初始设置 (见图 2a), 对模拟结果开展调和分析得到调和常数, 并与沿岸验潮站数据进行比较。为研究底摩擦系数、区域 A 水深增减、海岭位置南北移动和海峡喇叭口形态等因素对潮能通量的影响, 本文在控制试验的基础上设计了 4 组对比试验。试验 a 系列改变底摩擦系数, 将式 (9) 中的 C_d 分别设置为 0.000 01、0.001、0.01, 探讨底摩擦效应对潮能通量的影响。试验 b 系列对区域 A 水深进行

表 1 测试案例

Tab.1 Test cases

试验名称	设置	类别	试验目的
Ctrl	原始水深和岸线	控制试验	验证模型准确性
Exp_a1	$C_d=0.000\ 01$	底摩擦系列	探讨底摩擦效应对潮能通量的影响
Exp_a2	$C_d=0.001$		
Exp_a3	$C_d=0.01$		
Exp_b1	区域 A 水深加深	区域 A 深度系列	探讨区域 A 水深变化对潮能通量的影响
Exp_b2	区域 A 水深变浅		
Exp_c1	海岭位置向南移动约 2°	海岭位置系列	探讨海岭南北移动对潮能通量的影响
Exp_c2	海岭位置向北移动约 2°		
Exp_d1	海峡喇叭口形状削去	喇叭口形状系列	探讨喇叭口形状对潮能通量的影响
Exp_d2	海峡喇叭口形状填充		

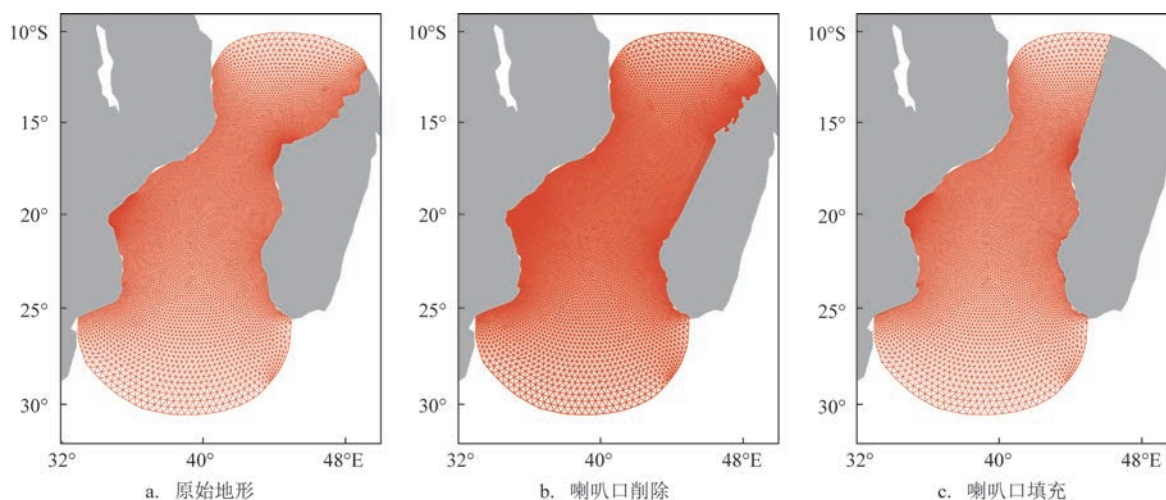


图2 不同岸线网格图

Fig.2 Different shoreline grids

抬升和加深,探讨该区域水深变化对潮能通量的影响。试验c系列将海岭整体向南、向北平移,探讨海岭空间位置对潮能通量的影响。试验d系列调整海峡通道喇叭口岸线形状,分别对喇叭口区域进行削除(见图2b)和填充(见图2c),分析喇叭口形状对潮能通量的影响。通过控制以上试验变量,探讨莫桑比克海峡潮能通量的主要影响因素。

均方根误差公式为:

$$\text{RMSE}_H = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(H_m - H_r)^2}{n}} \quad (10)$$

$$\text{RMSE}_g = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(g_m - g_r)^2}{n}} \quad (11)$$

式中: RMSE_H 代表振幅的均方根误差; H_m 表示模式模拟振幅; H_r 表示验潮站观测振幅; RMSE_g 代表迟

角的均方根误差; g_m 表示模式模拟迟角, g_r 表示验潮站观测迟角数据。

2 试验结果

2.1 控制试验

选用莫桑比克海峡及其附近海域4个验潮站(见图1)的实际潮位数据与模型结果进行对比,实测潮汐数据来源于张华等^[10]。由于大部分分潮振幅都在20 cm以下,对整体潮汐过程影响较弱,故仅对比 M_2 和 S_2 两个分潮的调和常数。剔除8月上旬模式启动阶段的计算结果,对2021年8月11日—10月31日的模拟数据进行调和分析,得到 M_2 、 S_2 分潮在每个网格格点的调和常数,并与4个验潮站观测结果进行对比。从表2结果来看,两类分潮振幅的平

表2 验潮站信息和 M_2 、 S_2 分潮调和常数对比结果Tab.2 The information of tide gauges and tidal harmonic constants of M_2 , S_2 tides

验潮站	经度	纬度	M_2 分潮		S_2 分潮	
			$\Delta H/\text{cm}$	$\Delta g/(\text{°})$	$\Delta H/\text{cm}$	$\Delta g/(\text{°})$
Nosy Be(T1)	48.300°E	13.400°S	-7.99	-2.91	-3.04	0.60
Dzaoudzi(T2)	45.267°E	12.783°S	5.82	3.02	2.33	3.29
Pemba(T3)	40.483°E	12.967°S	-1.54	-0.03	-3.33	1.63
Nacala(T4)	40.683°E	14.467°S	-5.28	-1.60	-2.68	-3.63
平均误差			-2.25	-0.38	-0.34	0.47
RMSE			5.66	2.24	2.87	2.60

均方根误差约为 4.26 cm, 迟角的均方根误差约为 2.42°; 仅 M_2 分潮振幅的模拟误差相对偏大, 其余潮位模拟结果与实际数据极为吻合, 可见该模型可以很好地反映莫桑比克海峡邻近海域的潮汐传播过程。

对模型稳定后的潮汐水位结果进行调和与分析。结果显示: 该海域潮汐以半日分潮 M_2 、 S_2 为主, 其次是 N_2 、 K_2 分潮, K_1 和 O_1 分潮占比不足 5%, 与张华等^[10]模拟结果一致。因此, 本文选取 M_2 、 S_2 、 N_2 和 K_2 分潮进行研究。使用 T_tide^[21] 工具包对潮汐水位进行调和与分析, 绘制得到 M_2 、 S_2 、 N_2 和 K_2 分潮同潮图。

图 3a 为 M_2 分潮调和与分析得到的振幅和迟角结果。模型计算得到莫桑比克海峡 M_2 分潮的振幅范围为 0~1.5 m。根据 Taylor^[22] 提出的矩形海湾旋转潮波形成机制, M_2 分潮振幅呈现典型旋转分布特

性。由图 3a 可知, 振幅在马达加斯加岛南部最小, 沿马达加斯加岛逆时针方向呈先增大后减小的变化趋势, 在莫桑比克海峡中央海岭附近达到最大值, 约为 1 m。以中央海岭为界, 南北两侧振幅基本呈对称分布并逐步递减, 由峰值 1 m 左右逐渐回落, 在马达加斯加岛西南部降至最小值 0.5 m, 振幅整体呈现西北高、东南低的分布特征。迟角同样沿马达加斯加岛逆时针递增, 由岛屿北部的 20° 逐步增至南部的 70°。

由图 3b—d 可知, 4 个分潮的振幅与迟角分布特征十分相似: 振幅均自海岭中部向两侧对称递减, 按大小排序依次为 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 ; 迟角均沿马达加斯加岛呈逆时针增大趋势。

控制试验的潮能通量分布见图 4。 M_2 分潮能量主体集中于中央海岭, 并向马达加斯加岛西南部传播; S_2 分潮能量主体同样集中在中央海岭, 潮能通量

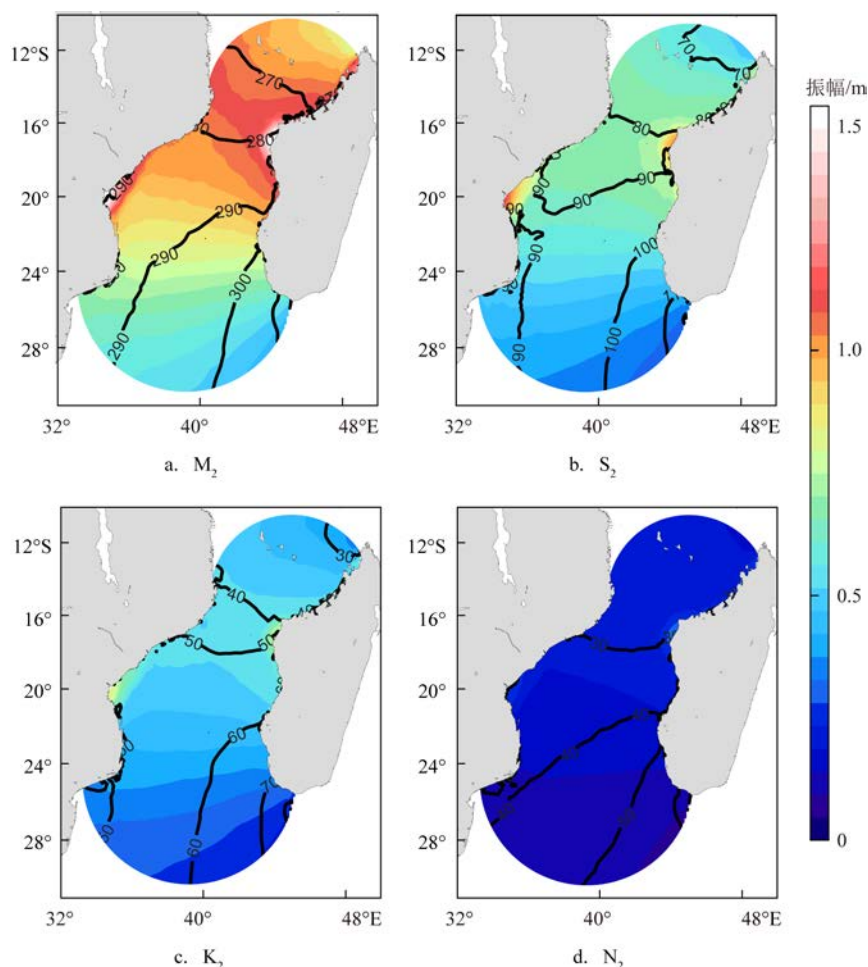


图3 控制试验同潮图

Fig.3 Co-tidal chart of the control experiment

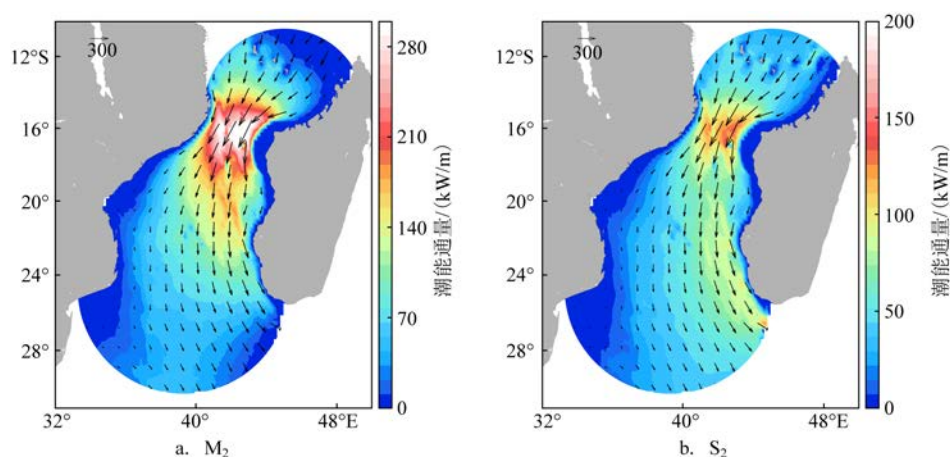


图4 控制试验潮能通量

Fig.4 Tidal energy flux of the control experiment

沿莫桑比克海峡向南直线传播至莫桑比克盆地。 M_2 和 S_2 分潮的潮能通量最大值都集中在 16°S 附近,且 M_2 的潮能通量明显大于 S_2 ; M_2 的最大潮能通量可达 413 kW/m ,高值区范围大; S_2 的潮能通量约为 207 kW/m ,高值区范围小。 M_2 潮能通量分布更加集中, S_2 分布相对分散;但在马达加斯加岛西南部沿岸海域, S_2 的潮能通量明显大于 M_2 。

2.2 底摩擦系数对潮能通量的影响

为探讨底摩擦对潮能通量的影响,本研究在a系列试验中将底摩擦系数(C_d)设为不同常数,以测试底摩擦效应对潮能通量的影响,结果见图5。改变底摩擦系数后, M_2 、 S_2 分潮的潮能通量高值仍集中在中央海岭处。结合控制试验结果(见图4)可

知,不同底摩擦系数下, M_2 和 S_2 潮能通量的空间分布和数值差异均较小,表明潮能通量对底摩擦变化并不敏感。究其原因,莫桑比克海峡平均深度较大,中部海岭最浅处水深也超过 $1\,000\text{ m}$,因此底摩擦对该区域潮能通量的影响几乎可以忽略。

2.3 海岭形态对潮能通量的影响

图6为海岭形态改变后的潮能通量空间分布。图6a—c为Exp_b1方案下区域A加深后 M_2 、 S_2 分潮的水深及潮能通量分布。将区域A水深加深,即将原来西部和东部的浅水区变成深水区, M_2 分潮的潮能通量分布与控制试验相近,通量高值位于海域中部,峰值约为 452 kW/m ; S_2 分潮的潮能通量也与控制试验类似,高值出现在马达加斯加岛近岸,峰值

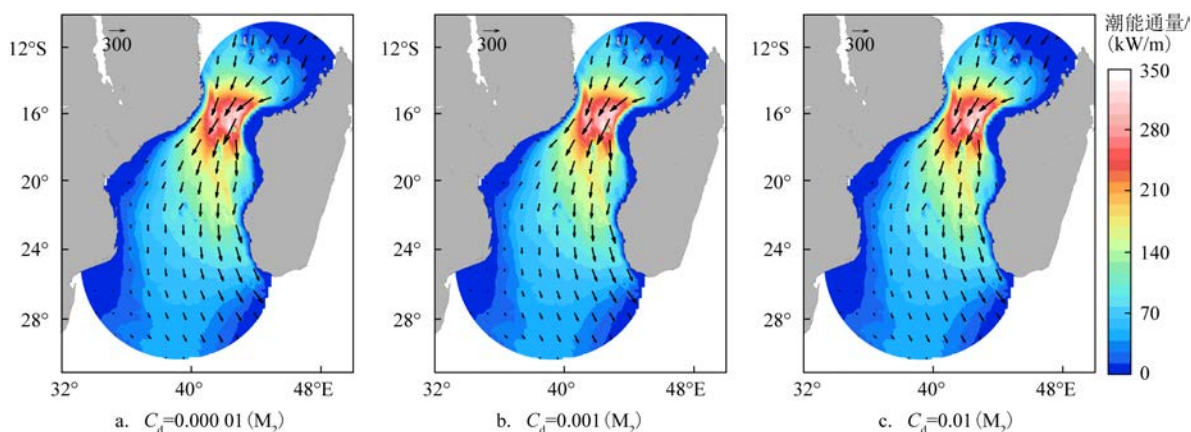


图5 不同底摩擦的潮能通量图

Fig.5 Tidal energy flux simulated by experiments with different drag coefficients

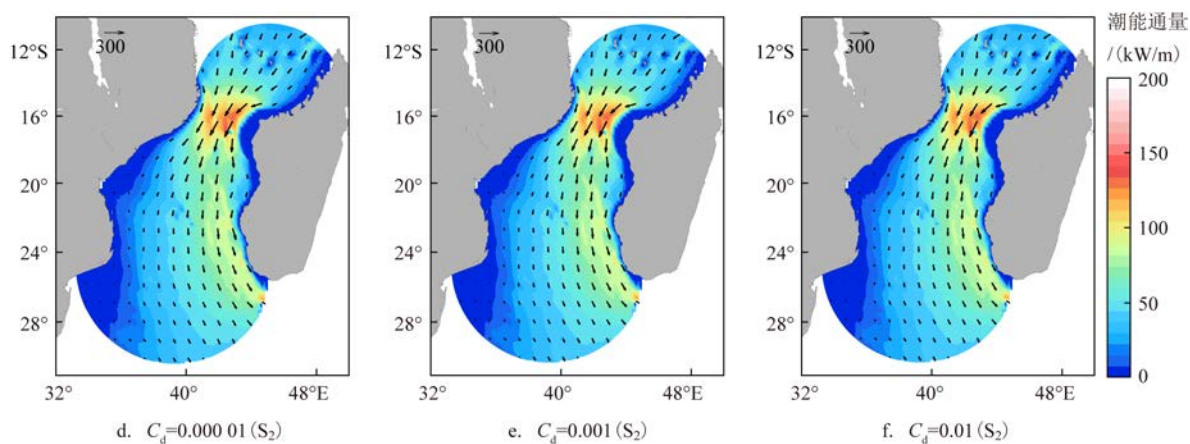


图5 (续)

Fig.5 (Continued)

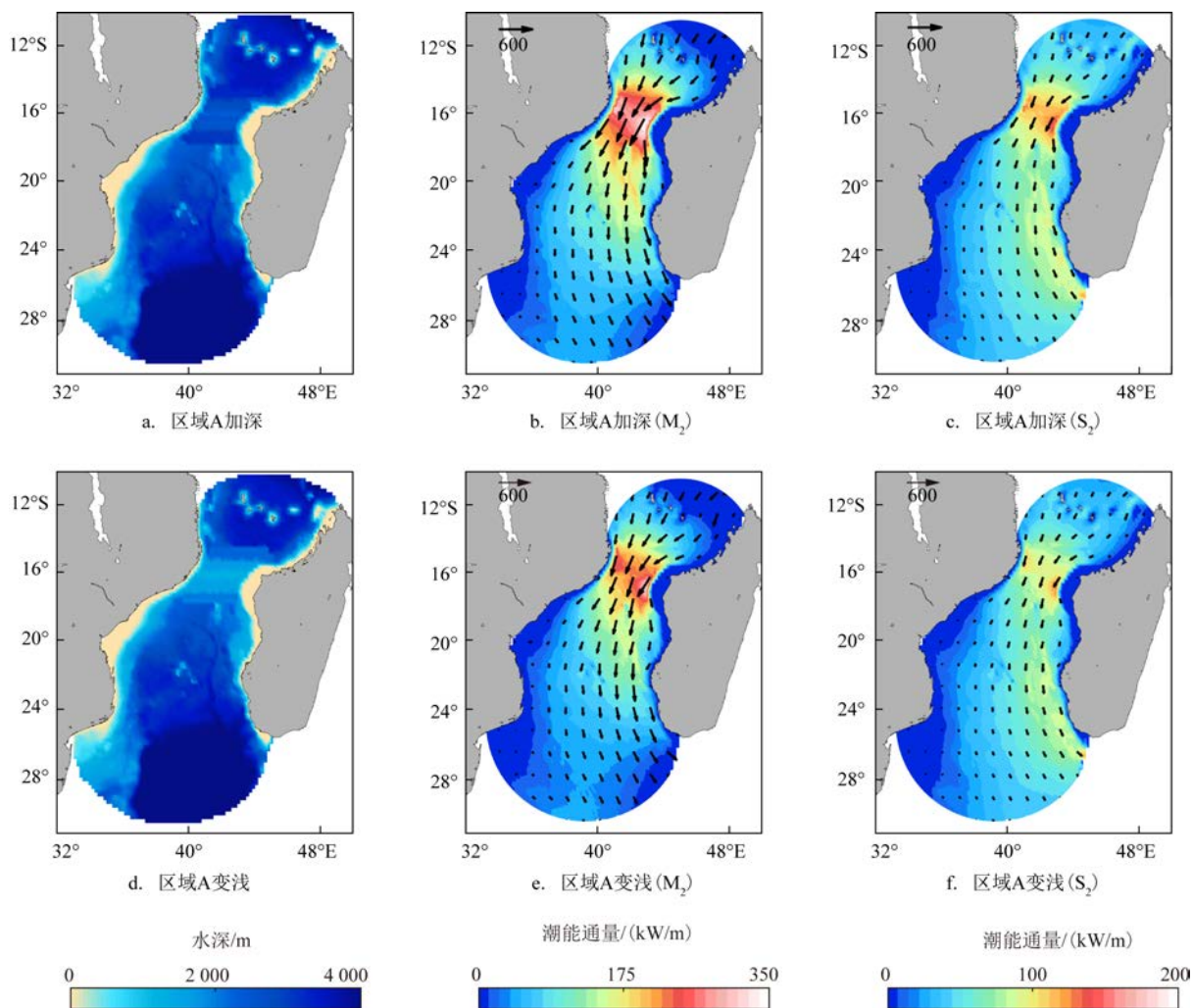


图6 海岭形态改变后的潮能通量图

Fig.6 Tidal energy flux diagram after the changes in seamount morphology

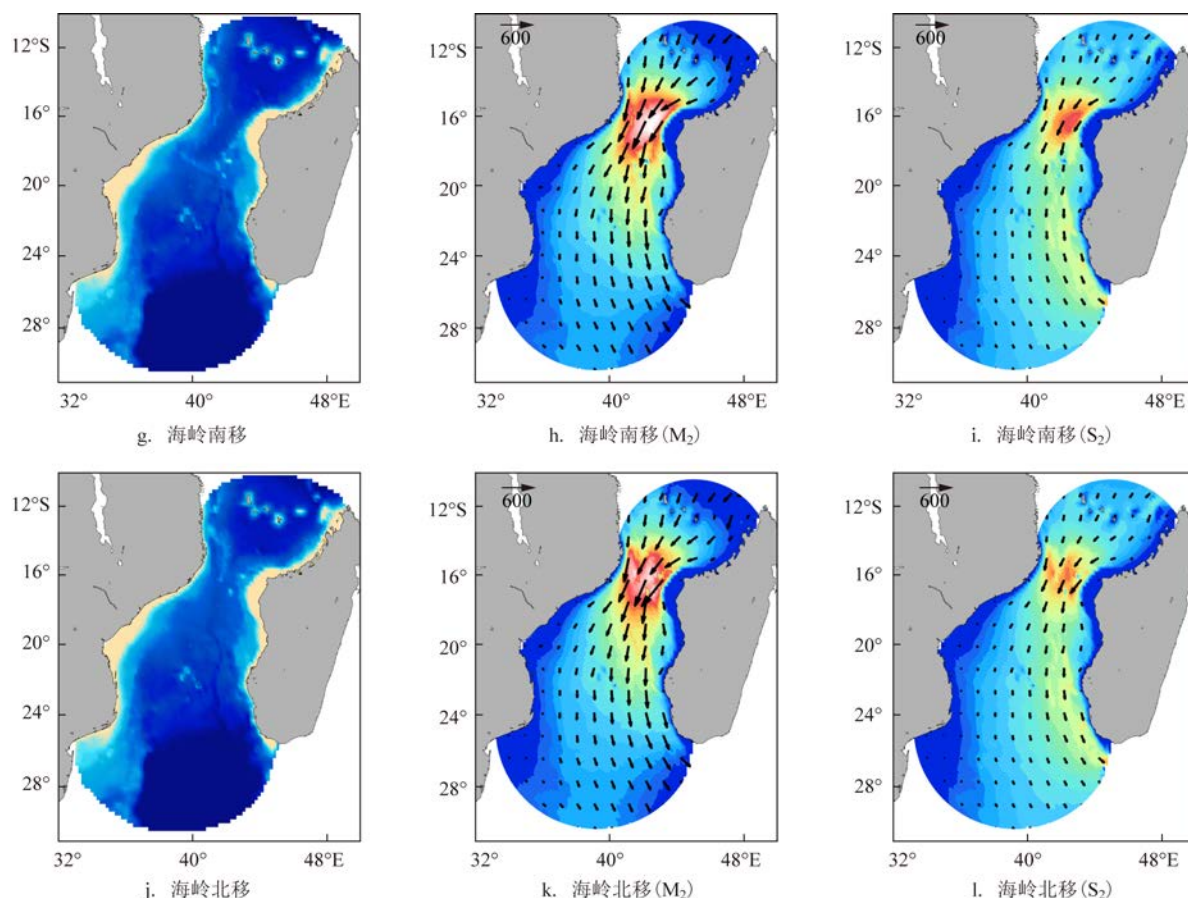


图6 (续)

Fig.6 (Continued)

约为 219 kW/m , M_2 与 S_2 的最大潮能通量均略高于控制试验。图 6d—f 为 Exp_b2 方案下区域 A 变浅后 M_2 、 S_2 分潮的水深及潮能通量分布, 潮能通量分布与控制试验存在明显差异, 区域 A 变浅后, M_2 潮能通量高值出现在马达加斯加岛沿岸, 峰值较控制试验偏低约 70 kW/m ; S_2 潮能通量高值仅分布在中央海岭靠近马达加斯加岛一侧, 峰值同样低于控制试验。

图 6g—i 为海岭南移后 M_2 、 S_2 分潮的水深及潮能通量分布, 图 6j—l 为海岭北移后的对应结果, 两组试验潮能通量整体分布与控制试验大致相同。海岭南移相当于抬升海峡北部水深, 海岭北移则相对减小海峡北部水深。海岭南移后潮能通量高值略向南偏移, 且 S_2 潮能通量整体分布范围更广、更均匀; 海岭北移后潮能通量整体分布不变, 高值略向北偏移。区域 A 水深变化后引起的潮能通量数值变化, 明显大于海岭南北移动带来的变化, 说明

海岭南北位置仅会改变潮能通量高值的空间位置, 而区域 A 水深变化则主要影响该区域潮能通量的总体量级。

2.4 喇叭口形状对潮能通量的影响

图 7 为不同喇叭口岸线形状下 M_2 、 S_2 分潮的潮能通量图。Exp_d1 方案下 M_2 分潮潮能通量最大值集中在中央海岭处约 16°S , 40°E 处 (见图 7a), 但峰值较控制试验有所降低, 约为 330 kW/m , 降幅约为 80 kW/m 。Exp_d1 方案下 S_2 分潮潮能通量最大值分布与 M_2 类似, 峰值同样较控制试验减少约 80 kW/m 。图 7b 为喇叭口填充后的 M_2 分潮潮能通量图, Exp_d2 方案下 M_2 和 S_2 的潮能通量分布和大小更接近控制试验, 其中 M_2 峰值偏小约 40 kW/m , S_2 偏小约 20 kW/m 。

喇叭口削除工况下, M_2 和 S_2 分潮的潮能通量总体低于喇叭口填充工况 (见图 7c、7d), M_2 偏小约

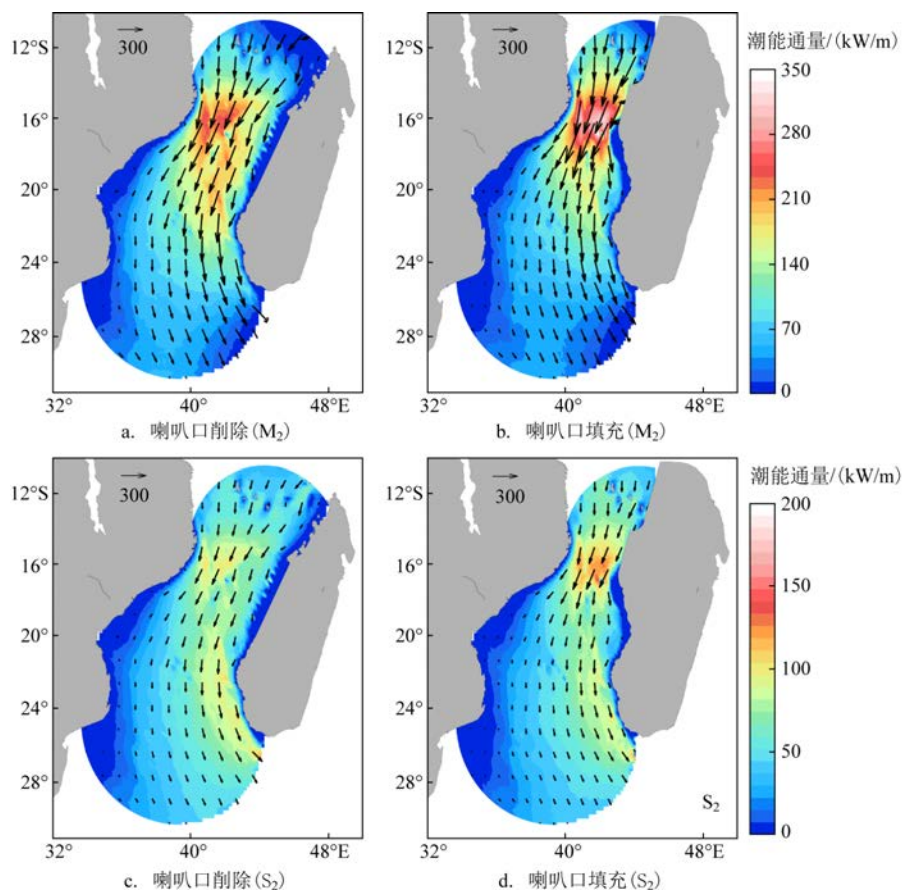


图7 岸线变化试验的潮能通量图

Fig.7 Tidal energy flux simulated by experiments with different coastlines

45 kW/m, S_2 偏小约 60 kW/m。喇叭口削除弱化了北部喇叭口岸线的“束窄效应”,而喇叭口填充则加强了岸线对潮能的聚集作用。该结果说明,喇叭口岸线形态是影响莫桑比克海峡潮能通量空间分布与大小的主导因素。

3 讨论

以往研究多将视角聚焦在莫桑比克的潮汐特征分析和潮能数值模拟上,张华等^[10]利用大气海洋通用环流模式(MIT General Circulation Model, MITgcm)详细研究了该海域 M_2 、 S_2 分潮的分布特征。本文采用 FVCOM 模型模拟得到的 M_2 、 S_2 分潮特征和张华等^[10]的研究成果基本一致,且与 4 个站点实测数据的对比结果也表明模型能较好地反演海域潮汐变化特征。

相较于张华等^[10]的研究,本文进一步通过数值试验,解释了莫桑比克海峡潮能通量最大区域的出现原因及其控制因子。调整喇叭口形状的试验结果表明,马达加斯加岛的岸线对于潮能汇聚最为重要。削除喇叭口岸线形状后, M_2 和 S_2 分潮的潮能通量均有所下降,且 M_2 分潮的潮能通量降幅更多。莫桑比克海峡地形条件特殊,与世界上其他大多数海峡存在差异,其海域深度普遍为 1 000~3 000 m,中部 Davie 海岭水深约 1 000 m。通过调整区域 A 水深和海岭位置可知:海岭位置仅能够改变潮能通量的空间分布,对幅度的调整作用不大,以调制作用为主;区域 A 水深变化对潮能通量的数值影响更为显著。此外,在多数海峡研究中较为重要的底摩擦因素,在莫桑比克海峡几乎没有对潮能通量产生影响。本研究不仅精细刻画了该海峡的潮汐特征,还探讨了控制海峡潮能通量的机制,明确影响权重排

序为喇叭口岸线>区域A深度>海岭位置>底摩擦因素,这有助于进一步理解这类特殊海峡的潮汐动力学过程。

但是,本文的模式研究还存在改进空间。该海域水深普遍超过1 000 m,层化效应不可避免地会对潮汐产生作用^[23];内潮诱发的水体混合可能会大幅改变海域能量收支^[24-25];不同季节水体层化强度可能会影响潮汐变化;半月的大小潮周期差异也会对潮能通量产生影响。然而本研究模型尚未考虑上述影响因子,但是这些影响不会造成本文研究结论出现较大偏移,可能仅会在小尺度波动范围内完善相关细节。未来的研究可以纳入海域海水的季节性层化以及大小潮差异开展深入分析。

4 结论

本研究基于广泛应用的FVCOM模型,模拟了莫桑比克海峡的潮汐特征,并通过一系列数值试验探讨了不同海底粗糙程度、区域A深度、Davie海岭位置以及海峡喇叭口形状等对潮能通量的影响。主要结论如下:

①模型能够较好地模拟莫桑比克海峡潮汐特征。海峡以半日潮为主,潮波按振幅大小排序依次为 M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 分潮,全日潮分量相比可以忽略不计。与4个验潮站相比, M_2 分潮振幅的均方根误差为5.66 cm,迟角的均方根误差为2.24°, S_2 分潮振幅的均方根误差为2.87 cm,迟角的均方根误差为2.60°。

② M_2 和 S_2 分潮的潮能最大值出现在海峡中部偏北约16°S, M_2 分潮的潮能通量最大值比 S_2 分潮大约200 kW/m。 M_2 分潮的潮能通量基本集中在Davie海岭处,而 S_2 则延伸到马达加斯加岛南部。二者的潮能均主要从北部进入海峡,沿着海峡左岸的马达加斯加岛向南部输运,在近岸段由于浅水效应幅值偏小。

③虽然海峡中部Davie海岭区域的潮能较大,但是数值试验表明导致潮能聚集的首要因子是束窄的岸线,第二是区域A的深度,第三是海岭的位置。后两个因素仅能够小幅调制潮能通量,即区域A的深度会影响潮能通量大小,海岭位置会影响潮能通量分布。由于海峡水深普遍在1 000 m以上,潮能通量对底摩擦特征尺度的选取并不敏感。

参考文献:

- [1] 秦志浩, 胡松, 程灵巧. 基于FVCOM的库克海峡邻近海域潮汐模拟研究[J]. 海岸工程, 2025, 44(2): 173-185.
QIN Z H, HU S, CHENG L Q. Tidal simulation in the adjacent sea area of Cook Strait based on FVCOM[J]. Coastal Engineering, 2025, 44(2): 173-185.
- [2] RIDDERINKHOF H, VAN DER WERF P M, ULLGREN J E, et al. Seasonal and interannual variability in the Mozambique Channel from moored current observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C6): C06010.
- [3] 方国洪, 曹德明, 黄企洲. 南海潮汐潮流的数值模拟[J]. 海洋学报, 1994, 16(4): 1-12.
FANG G H, CAO D M, HUANG Q Z. Numerical simulation of tidal currents in South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1994, 16(4): 1-12.
- [4] 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.
ZHU X M, LIU G M. Numerical study on the tidal currents, tidal energy fluxes and dissipation in the China seas[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2012, 43(3): 669-677.
- [5] 张学庆, 刘晓敏, 王鹏程, 等. 潮-径相互作用下大辽河口潮能通量的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2012, 27(3): 331-338.
ZHANG X Q, LIU X M, WANG P C, et al. Numerical simulation of the tidal energy flux influenced by tide and runoff in Daliaohe River Estuary[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(3): 331-338.
- [6] 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(5): 713-718.
LI P L, LI L, ZUO J C, et al. Tidal energy fluxes and dissipation in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(5): 713-718.
- [7] EGBERT G D, RAY R D. Estimates of M_2 tidal energy dissipation from TOPEX/Poseidon altimeter data[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2001, 106(C10): 22475-22502.
- [8] CHEVANE C, PENVEN P, NEHAMA F, et al. Modelling the tides and their impacts on the vertical stratification over the Sofala Bank, Mozambique[J]. African Journal of Marine Science, 2016, 38(4): 465-479.
- [9] CANHANGA S, DIAS J M. Tidal characteristics of Maputo Bay, Mozambique[J]. Journal of Marine Systems, 2005, 58(3-4): 83-97.
- [10] 张华, 温茜茜, 彭世球. 莫桑比克海峡及其邻近海区正压潮流数值模拟与能量收支分析[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(2): 7-16.
ZHANG H, WEN Q Q, PENG S Q. Numerical simulation of barotropic tides in Mozambique Strait and its adjacent coastal area and energy budget analysis[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(2): 7-16.
- [11] 于寒, 刘桂梅, 纪棋严, 等. 基于FVCOM的福建连江海域潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 1-12.
YU H, LIU G M, JI Q Y, et al. Numerical simulation of tide and

- tidal current in Lianjiang sea area of Fujian province based on FVCOM[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(6): 1-12.
- [12] 姚鼎, 李铨, 张凤林, 等. 台风“利奇马”对长江口水通量影响的数值模拟研究[J]. *海洋预报*, 2024, 41(4): 66-76.
- YAO D, LI C, ZHANG F L, et al. Numerical simulation of the impact of Typhoon "Lekima" on water flux in the Changjiang Estuary[J]. *Marine Forecasts*, 2024, 41(4): 66-76.
- [13] 朱宇航, 陈勤思, 徐一凯, 等. 基于国产操作系统的海湾污染物扩散输运预报系统——以象山港为例[J]. *海洋预报*, 2022, 39(5): 48-59.
- ZHU Y H, CHEN Q S, XU Y K, et al. Pollutant diffusion and transport prediction system in a bay based on domestic operating system—a case study of Xiangshan Bay[J]. *Marine Forecasts*, 2022, 39(5): 48-59.
- [14] 范锦晓, 胡松. 潮汐和风对马六甲海峡海流的影响[J]. *热带海洋学报*, 2020, 39(4): 13-24.
- FAN J X, HU S. Impact of tides and winds on currents in the Malacca Strait[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2020, 39(4): 13-24.
- [15] 周相乾, 胡松, 张瑜. 南极布兰斯菲尔德海峡正压潮数值模拟[J]. *极地研究*, 2019, 31(1): 56-68.
- ZHOU X Q, HU S, ZHANG Y. Numerical simulation of barotropic tide in the Bransfield Strait, Antarctica[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2019, 31(1): 56-68.
- [16] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system[J]. *Oceanography*, 2006, 19(1): 78-89.
- [17] 宋倩, 胡松. 海洋模式 FVCOM2.6 并行计算性能 TAU 分析[J]. *计算机工程与科学*, 2011, 33(12): 87-93.
- SONG Q, HU S. Analysis of the parallel computing performance of ocean model FVCOM2.6 using TAU[J]. *Computer Engineering & Science*, 2011, 33(12): 87-93.
- [18] 胡松, 陈长胜, 高郭平, 等. 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[J]. *上海海洋大学学报*, 2012, 21(4): 621-629.
- HU S, CHEN C S, GAO G P, et al. Preliminary analysis of tide simulation of the East China Sea of the Global-FVCOM model[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2012, 21(4): 621-629.
- [19] CHEN C S, LIU H D, 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.
- [20] WESSEL P, SMITH W H F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101(B4): 8741-8743.
- [21] PAWLOWICZ R, BEARDSLEY B, LENTZ S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28(8): 929-937.
- [22] TAYLOR G I. Tidal oscillations in gulfs and rectangular basins[J]. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1922, s2-20(1): 148-181.
- [23] CHENG P, WILSON R E, CHANT R J, et al. Modeling influence of stratification on lateral circulation in a stratified estuary[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(9): 2324-2337.
- [24] ALFORD M H. Redistribution of energy available for ocean mixing by long-range propagation of internal waves[J]. *Nature*, 2003, 423(6936): 159-162.
- [25] RAY R D, MITCHUM G T. Surface manifestation of internal tides generated near Hawaii[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(16): 2101-2104.

Numerical simulation of tides in the Mozambique Channel based on FVCOM

YIN Qi, XU Boxuan, QIN Zhihao, HUANG Daiying, HU Song*

(College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The Mozambique Channel is the longest channel in the world, with unique tidal wave dynamic characteristics. This study simulates the tidal dynamic processes in the Mozambique Channel using the Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM). Numerical experiments are conducted with different drag coefficients, seamount morphologies, and coastline characteristics. The results show that the tidal wave system in the Mozambique Channel and its adjacent sea areas are dominated by the semi-diurnal tides M_2 and S_2 , and the maximum tidal current energy occurs at the narrowest part of the Mozambique Channel. The narrowing effect of the horn-shaped coastline in the northern part of the channel has the greatest impact on the tidal energy flux. The depth and location of seamounts can modulate the tidal energy flux slightly, while the bottom friction has a negligible impact on the tidal energy flux.

Key words: Mozambique Channel; tidal numerical simulation; FVCOM; tidal energy flux