

文章编号: 1674-5566(2024)06-1406-12

DOI: 10.12024/jsou.20240204430

## 斯里兰卡邻近海域潮汐潮流的数值模拟

谭 杨, 高郭平, 邓创武, 许瑞城, 李世凯

(上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306)

**摘要:** 为了深入了解斯里兰卡邻近海域潮汐潮流的分布规律和物理机制, 研究采用FVCOM(Finite-volume community ocean model)模型建立了精细化三维正压潮汐动力模型, 模拟并研究了研究区域内4个主要分潮( $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ )的潮汐潮流特征。通过将数值模拟结果与验潮站水位数据和卫星调和常数数据进行对比, 认为本文所构建的模型结果可信, 数值模拟方案可行。根据计算结果, 绘制了斯里兰卡邻近海域4个主要分潮的潮汐、潮流和潮能通量的分布图, 并探讨了引潮力对潮汐分布的影响, 比较了半日潮和全日潮潮波系统的结构差异。结果显示, 研究区域内的潮汐类型以正规半日潮和不正规半日潮为主, 天体引潮力对全日潮的作用甚大。海域内的半日潮和全日潮存在系统性的差异: 半日潮形成方向相反的双潮波系统, 全日潮形成逆时针的单潮波系统; 半日潮流主要表现为旋转流, 全日潮流主要表现为往复流; 平均潮能通量呈现西高东低的分布特征, 半日潮的潮能聚集在马尔代夫群礁的东西两侧, 全日潮的潮能聚集在赤道附近。本研究进一步丰富了斯里兰卡海域的潮汐潮流特征研究, 并首次探讨了天体引潮力对海域内潮汐分布的影响。

**关键词:** 潮汐; 潮流; 数值模拟; FVCOM; 斯里兰卡

**中图分类号:** P 731.23

**文献标志码:** A

斯里兰卡是连接东亚地区至中东、非洲和欧洲的海运航线的必经之地, 是“21世纪海上丝绸之路”的关键节点之一, 拥有多个重要港口, 地缘战略地位突出。其中, 位于斯里兰卡西南部的科伦坡港在2021年实现了725万标箱的集装箱吞吐量, 较2020年增长了5.8%, 在全球最佳港口排名中位列第22位。准确获取潮汐和潮流状态信息对于港口的基础设施建设、维护, 船舶的进出港操作以及离岸港口活动等方面具有重要意义<sup>[1]</sup>。潮汐循环的精确模拟被认为是港口内密度变化、沉积物输送、水质建模等更为复杂的水动力学模拟的先决条件<sup>[2]</sup>。此外, 在紧急情况下, 搜索和救援行动以及溢油事故处理中, 短期潮汐潮流预报也尤为关键<sup>[3]</sup>。

斯里兰卡位于受南亚季风控制的东印度洋海域<sup>[4]</sup>, 主要呈现出半日潮和以半日潮为主的混合潮类型<sup>[5]</sup>。早期印度洋海平面观测的研究主要依赖于验潮仪等实测数据<sup>[6]</sup>, 这些数据为沿岸活

动和海啸预警提供了基础。然而, 验潮仪观测通常局限于海岸线, 导致空间分布相对稀疏<sup>[7]</sup>。随着卫星测高技术的发展, 全球范围内高精度海平面高度的获取成为可能, 通过开尔文波和庞加莱波的空间组合模式, 可以直接观测到海洋的整体变化<sup>[8]</sup>。随后, 诸如FES、GOT、TPXO等全球海洋潮汐模型相继出现<sup>[9]</sup>。这些模型为研究人员提供了快速了解海域潮汐特征的工具, 同时也被用来作为边界条件, 构建新的潮汐动力预报模型, 弥补了印度洋区域实测数据不足的问题, 从而促进对广泛海域潮汐特性及其动力机制的深入研究。

MAAS等<sup>[10]</sup>运用TPXO8-atlas所包含的9种潮汐分量, 制作了印度洋中部 $M_2$ 分潮的同潮图。PRINGLE等<sup>[11]</sup>以TPXO8潮汐成分为基础, 构建了印度洋和西太平洋的有限元正压模型, 并对侧边界条件、水深和耗散过程的敏感性进行了探讨。万荣强等<sup>[12]</sup>采用DTU10潮汐成分作为驱动, 基于FVCOM模型建立了北印度洋海域的半

收稿日期: 2024-02-28

修回日期: 2024-07-03

基金项目: 中国科学院战略性先导科技(A类)专项(XDA20060503)

作者简介: 谭 杨(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为海洋模型。E-mail: contacttanyang@163.com

通信作者: 高郭平, E-mail: gpgao@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

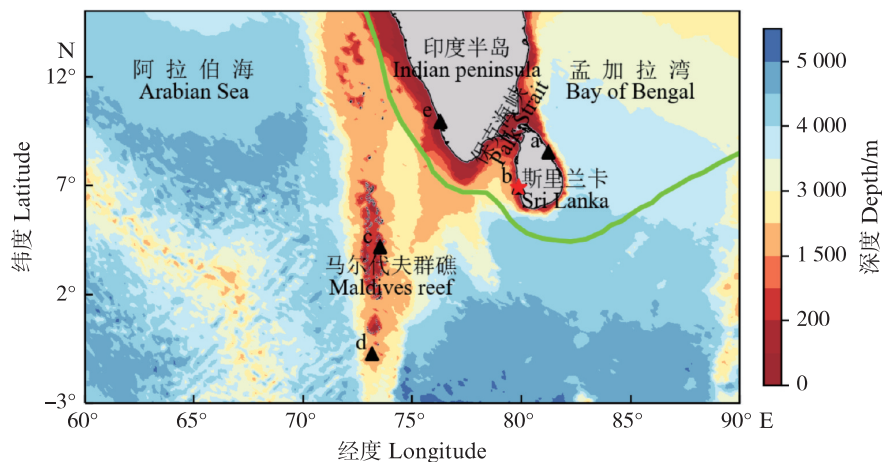
Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

日潮波数值模型,并对该地区主要半日潮的潮汐潮流特征展开了研究。随着“一带一路”倡议的推进,斯里兰卡在地区战略中的重要性日益凸显。越来越多的学者开始针对斯里兰卡邻近海域以及关键港口进行数值模拟应用研究。例如,李雨<sup>[13]</sup>利用Mike模式对汉班托塔港人工岛实施前后的流场、流速进行了深入研究,从而证明了人工岛选址的合理性。此外,KODITHUWAKKU等<sup>[14]</sup>运用POM模式和水位观测数据,研究了斯里兰卡北部海岸风暴潮和潮汐的相互作用特征。这些研究为斯里兰卡邻近海域港口和航道建设提供了科学的依据。但是,针对斯里兰卡邻近海域潮汐动力学的研究还比较缺乏,对斯里兰卡邻近海域潮流特性探讨也较少,构建更为精确的潮汐动力模型,开展

该地区潮汐特征模拟,对于深入了解潮汐潮流的变化规律和物理机制,为北印度洋斯里兰卡邻近海域的港口活动、海洋航运以及防灾减灾等领域提供科学结果,为推进“21世纪海上丝绸之路”战略发展提供支持。

本文以斯里兰卡邻近海域为研究区域(图1),涵盖途经斯里兰卡的主要航道和关键节点港口。采用FVCOM数值模型,建立精细化的斯里兰卡邻近海域潮汐动力数值模型,利用验潮站实测数据以及卫星高度计数据,开展模型验证,研究主要半日潮( $M_2$ 、 $S_2$ )和主要全日潮( $K_1$ 、 $O_1$ )的潮汐特征。此外,结合模拟结果和全球同化正压潮汐模型TPX09-atlas-v5,进一步分析研究区域内的潮动力特征。



绿色实线和红色星形分别表示“21世纪海上丝绸之路”的主要路线和节点港口城市;黑色三角形和字母表示验潮站站位和站号。  
The green solid lines and red stars indicate the main routes and nodal port cities of the “21st Century Maritime Silk Road”; the black triangles and letters indicate the positions and numbers of the tide gauge stations.

图1 斯里兰卡邻近海域地形分布示意图

Fig. 1 Topographic distribution in the adjacent area of Sri Lanka

## 1 材料与方法

### 1.1 数值模型

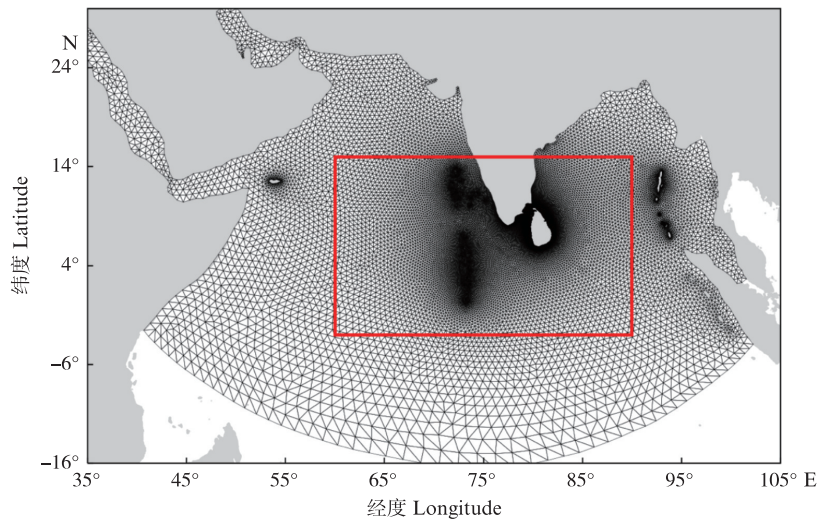
本文使用海洋数值模型 FVCOM (Finite-volume community ocean model) 构建潮汐动力模型。模型在水平方向上采用分辨率可变的非结构三角网格,垂向上采用层数及深度可变的 $\sigma$ 坐标系统,便于拟合北印度洋复杂的海岸线及地形地貌。同时,有限体积法在离散过程中能有效地保证海洋计算中质量、盐度、动量、能量等物理量得以守恒。FVCOM 已广泛应用于河口、近岸和湖泊等水域,既可用于正压潮汐模拟(不包含密

度变化),又可用于斜压动力模拟。

基于北印度洋的岸线和地形特征,模拟区域确定为 $35^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$ ,  $15^{\circ}\text{S} \sim 25^{\circ}\text{N}$ ,涵盖了波斯湾、红海、阿拉伯海、孟加拉湾和拉科代夫海等海域(图2)。计算网格在斯里兰卡近岸、马尔代夫群礁以及重要岛屿区域进行了加密处理。水平分辨率在开阔大洋的开边界处最粗,为 $80\,000\text{ m}$ ,在科伦坡港口处最为精细,为 $50\text{ m}$ 。网格总共包含 $24\,576$ 个节点和 $47\,358$ 个三角单元。垂直方向划分为 $31$ 个 $\sigma$ 层。由于模拟范围大且跨越南北半球,科里奥利力和天体引潮力的作用不容忽视,因此我们采用球坐标下的原始方程,并在未

经扰动的海面潮高度上加入平衡潮引起的水位变化。本文所用平衡潮成分的振幅  $A_e$  参考

SCHWIDERSKI<sup>[15]</sup>在1980年提供的潮汐参数,订正因子 $\beta$ 参考FVCOM用户手册<sup>[16]</sup>,见表1。



红色框线内为本文的研究区域。

The area within the red box indicates the study area of this paper.

图2 斯里兰卡模型计算网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the computational grid of the Sri Lanka model

表1 8个主要天文分潮 $A_e$ 和 $\beta$ 的取值

Tab. 1 Values of  $A_e$  and  $\beta$  of the eight main tidal constituents

参数 Parameters	$S_2$	$M_2$	$N_2$	$K_2$	$K_1$	$P_1$	$O_1$	$Q_1$
振幅 $A_e$	0.693	0.693	0.693	0.693	0.736	0.706	0.695	0.695
订正因子 $\beta$	0.112 841	0.242 334	0.046 398	0.030 704	0.141 565	0.046 843	0.100 514	0.019 256

模型的海底粗糙长度为  $1.0 \times 10^{-3}$ , 最小拖曳系数为  $1.5 \times 10^{-3}$ 。采用内外模分离的方式求解动量和连续方程的积分, 根据 CFL 稳定性准则进行计算, 外模时间步长为 1.0 s, 内模时间步长为 10 s。整个海域的温度和盐度均设为常数, 温度为 27 °C, 盐度为 35。模型由边界潮汐驱动, 采用冷启动, 从静止状态开始连续运行一年 (2021 年), 每小时输出一次水位和流速数据, 用于进一步的验证和分析。

## 1.2 验证数据

### 1.2.1 其他模型数据

开边界上的潮汐调和常数来自美国俄勒冈州立大学建立的大洋潮汐模型 TPX09-atlas\_v5。

该潮汐模型是 TPXO 全球潮汐模型系列最新的模型, 由 TPX09.1 的  $1/6^\circ$  全球模型和 30 个  $1/30^\circ$  分辨率的局部模型组合而成, 分辨率为  $1/30^\circ \times 1/30^\circ$ 。TPX09-atlas\_v5 在研究区域内的模拟表现较优, 与实测相比 (表 2), 4 个主要天文分潮振幅和迟角的平均均方根偏差分别为 0.73 cm 和  $3.53^\circ$ , 相对比 TPX07.2 的 2.51 cm 和  $3.73^\circ$ , 在近岸振幅上的模拟有所改进。TPX09-atlas\_v5 提供了 15 种潮汐成分, 本研究取其中 8 个主要天文分潮 ( $Q_1$ 、 $O_1$ 、 $P_1$ 、 $K_1$ 、 $N_2$ 、 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_2$ ) 的调和常数, 基于潮汐预测软件 PYTMD, 计算得到开边界上每个节点的水位时间序列, 用于模型驱动。

表2 2个潮汐模型调和常数的差异

Tab. 2 Differences in harmonic constants between two tidal models

潮汐模型 Ocean tide models	振幅均方根偏差 Amplitude RMSE/cm				迟角均方根偏差 Phase-lag RMSE/(°)			
	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$	$M_2$	$S_2$	$K_1$	$O_1$
TPX09-atlas_v5	0.89	0.68	0.89	0.47	2.10	3.22	4.06	4.72
TPX07.2	3.51	1.57	3.27	1.81	2.78	3.27	4.05	4.82

模拟区域的水深数据来自高分辨率全球水深地形数据集 ETOPO1。该数据集由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的国家地理数据中心(NGDC)开发和维护,基于大量相关模型和实测区域数据制作而成,融合了全球的陆地地形和海洋深度数据,空间分辨率为1'×1'。

### 1.2.2 验潮数据

验潮站水位数据选用了来自由佛兰德斯海洋研究所(VLIZ)和政府间海洋学委员会(IOC)联合编制的长期平均海平面(MSL)数据。该数据源自GLOSS数据中心,专注于实时收集和重新分发高频相对海平面数据。大多数站点每分钟提供一次测量值,每5分钟更新一次,本研究选取了整小时的数据用于与模型结果进行对比计算。卫星测点调和常数数据源自AVISO+发布的区域沿轨潮汐调和常数产品 Coastal Tide - X-TRACK。该产品由长时间卫星高度计任务(Topex/Poseidon、Jason-1、Jason-2)谐波分析得到,提供了世界上所有的沿海海域区域尺度上沿轨的潮汐调和常数,可用于潮汐研究、潮汐模型的验证和同化。本研究所使用的数据来自该产品中的北印度洋区域模块,为进一步保证数据的可用性,选取上下行轨道的交叉点数据用作对比验证。

## 1.3 分析评估方法

### 1.3.1 模型评估方法

为了评估模型结果,以下介绍本文用于计算模拟值和观测值之间偏差的统计指标,包括均方根偏差RMSE、相对平均误差 $E$ 及Pearson相关系数 $r$ :

$$\text{RMSE} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\eta_{\text{mod}} - \eta_{\text{obs}}|^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

$$E = 100\% \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_{\text{mod}} - \eta_{\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (|\eta_{\text{mod}} - \bar{\eta}_{\text{obs}}|^2 + |\eta_{\text{obs}} - \bar{\eta}_{\text{obs}}|^2)} \quad (2)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\eta_{\text{mod}} - \bar{\eta}_{\text{mod}})(\eta_{\text{obs}} - \bar{\eta}_{\text{obs}})}{\left[ \sum_{i=1}^n (\eta_{\text{mod}} - \bar{\eta}_{\text{mod}})^2 \sum_{i=1}^n (\eta_{\text{obs}} - \bar{\eta}_{\text{obs}})^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为比较的参数; $n$ 为比较参数的个数;下标mod和obs分别为模型和观测数据。水位的对比要同时考虑数值大小与相位的偏差,因此同时选用RMSE、 $E$ 、 $r$ 等3个统计指标。调和常数的对比则选用RMSE和 $E$ 这2个统计指标。

### 1.3.2 潮能通量计算方法

潮能通量强度亦称为潮能通量密度,指的是单位时间通过海底至海面单位密度宽度断面的潮能,对于潮汐周期上的单位宽度断面,通量可以直接根据谐波成分进行计算<sup>[17]</sup>:

$$\varphi_x = \frac{1}{2} \rho g h H U \cos(g_{\text{H}} - g_{\text{U}}) \quad (4)$$

式中: $\varphi_x$ 为潮能通量密度的东向分量; $\rho$ 为海水密度; $g$ 为重力加速度; $h$ 为水深; $H$ 和 $g_{\text{H}}$ 分别为水位的振幅和相位; $U$ 和 $g_{\text{U}}$ 分别为东向潮流的振幅和相位。同样地,可以使用该方法计算潮能通量密度的北向分量。

## 2 结果与分析

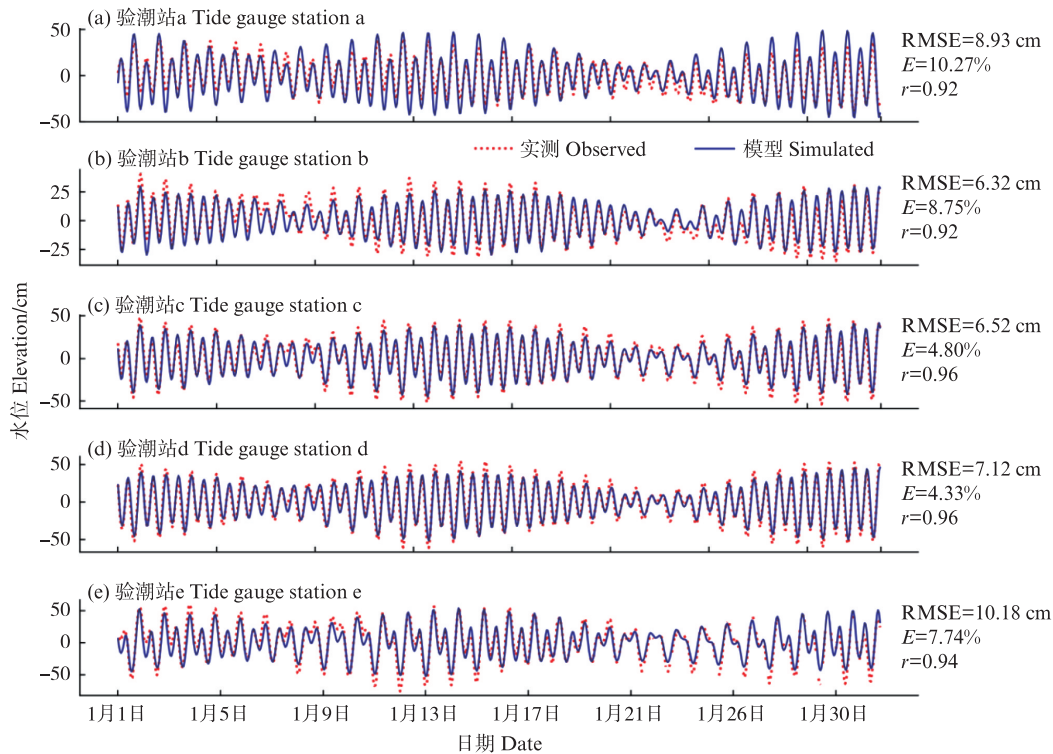
### 2.1 模型验证

#### 2.1.1 验潮站对比

为显示模型在近岸短时间尺度上的潮位模拟性能,我们将模型结果与验潮站逐小时实测水位数据进行对比。所选用的验潮站共计有5个(分布详见图1)。根据图3的水位验证结果,5个站点的水位均方根偏差为6.45~10.18 cm,相对平均误差为4.33%~10.27%,相关性为0.92~0.96。模拟结果能够准确反映潮高的变化以及高低潮的发生时刻,与实测数据具有良好的一致性。

#### 2.1.2 卫星高度计对比

为进一步评估模型对广泛海域主要分潮的模拟能力,我们将模拟结果的水位进行调和分析,得到4个主要分潮( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ )的调和常数,并将其与卫星调和常数产品进行对比。分潮的调和分析使用MATLAB的T\_TIDE工具<sup>[18]</sup>,实现基于最小二乘拟合的经典调和分析。为了排除陆地边缘误差的潜在影响,我们剔除了水深小于100 m的卫星测点,最终选择了62个测点用于对比分析。图4展示了在各个卫星测点位置,模型计算结果与卫星测高数据在4个主要分潮的振幅和迟角之间的相关关系。 $M_2$ 分潮振幅和迟角的均方根偏差分别为2.60 cm和7.28°,  $S_2$ 分潮振幅和迟角的均方根偏差分别为1.71 cm和9.34°,  $K_1$ 分潮振幅和迟角的均方根偏差分别为5.50 cm和18.66°,  $O_1$ 分潮振幅和迟角的均方根偏差分别为2.69 cm和14.65°。综合而言,4个主要分潮的振幅验证结果良好,主要全日潮迟角的验证结果相对较差,整体误差在可接受的范围内,可用于进一步的潮汐潮流特征分析。



红色虚线表示实测数据,蓝色实线表示模拟数据。

Red dashed lines indicate observed data, blue solid line indicate simulated data.

图3 模型模拟结果与验潮站观测水位数据对比的时间序列图

Fig. 3 Time series plot of model simulation results compared with observed elevation data at tide gauge stations

## 2.2 潮汐分布

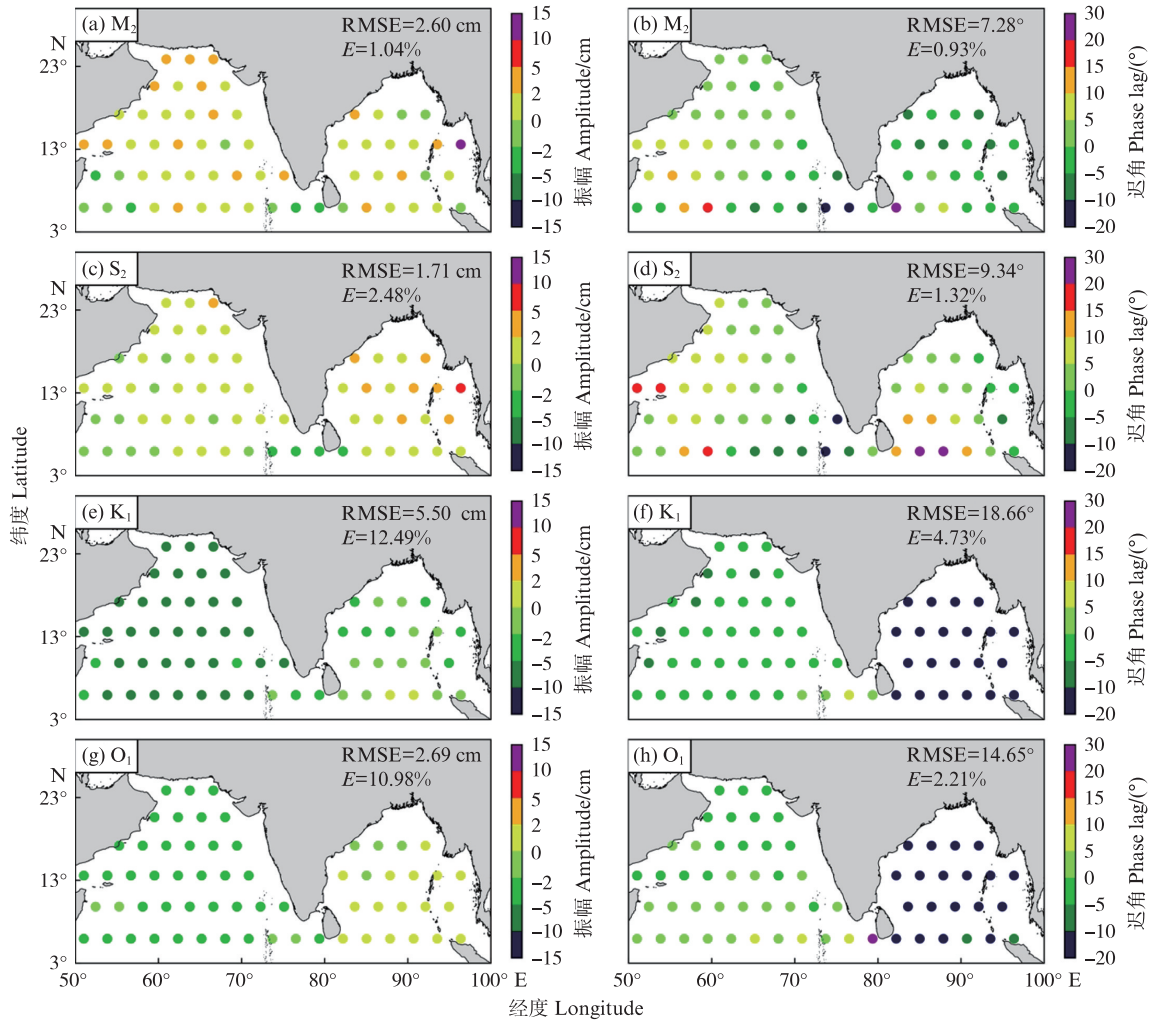
图5为研究区域内4个主要分潮的同潮图。 $M_2$ 分潮的潮波来自印度洋中部,继而向北传播分化成两股,其中一股向西北方向顺时针传播,与来自莫桑比克海峡的 $M_2$ 潮波汇合,共同进入阿拉伯海;另一股向东北方向逆时针传播,进入孟加拉湾。潮波在阿拉伯海形成一个顺时针旋转的潮波系统,无潮点位于阿拉伯海南部( $61.75^\circ\text{E}$ ,  $1.13^\circ\text{N}$ );在斯里兰卡东南部海域形成另一逆时针旋转的潮波系统,无潮点退化到了斯里兰卡岛东南沿岸。分潮的振幅幅值为0.1~0.4 m,振幅高值区分布于阿拉伯海和孟加拉湾的顶部。 $S_2$ 分潮的潮汐分布与 $M_2$ 分潮类似,但振幅相对较小。 $K_1$ 分潮的潮波来自阿拉伯海顶部,潮波沿着印度半岛西部沿岸逆时针传播,绕过斯里兰卡南部海域,传播至孟加拉湾顶部。潮波在研究区域内形成一个逆时针旋转的单潮波系统,无潮点位于斯里兰卡岛南部海域( $79.79^\circ\text{E}$ ,  $3.64^\circ\text{N}$ )。分潮的振幅幅值为0.04~0.24 m,振幅高值区分布于阿拉伯海北部。阿拉伯海的振幅幅值(0.04~0.24 m)要明显大于孟加拉湾(0.04~0.08 m)。 $O_1$ 分潮的潮汐

传播特征与 $K_1$ 分潮类似,但无潮点的位置要更靠近斯里兰卡岛( $81.69^\circ\text{E}$ ,  $5.05^\circ\text{N}$ ),振幅也相对较小。

采用潮汐类型指标值 $A = (H_{K_1} + H_{O_1})/H_{M_2}$ 作为判断参数<sup>[19]</sup>,计算得到研究区域内的潮汐类型分布图(图6)。阿拉伯海主要为不规则半日潮,在阿拉伯海的无潮点周围,存在着局部的正规全日潮,外围环绕着不正规全日潮。印度半岛东部海域主要为正规半日潮,而从斯里兰卡岛东南沿岸延伸至苏门答腊岛的区域为不正规半日潮。

## 2.3 潮流分布

图7为研究区域内4个主要分潮的潮流椭圆分布图。 $M_2$ 分潮的潮流在阿拉伯海主要为顺时针的旋转潮流,旋转率随着接近无潮点的位置而增加。斯里兰卡南部海域延伸至赤道南部附近主要为逆时针的旋转潮流,而越靠近孟加拉湾顶部,旋转率越低,逐渐过渡为往复潮流。 $S_2$ 分潮与 $M_2$ 分潮相比,分布特征基本一致,但流速相对较小。 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮的潮流在研究区域内主要为往复潮流。4个主要分潮的潮流高值区均位于以下区域:印度半岛和斯里兰卡的西部沿海,保克海峡和马尔代夫群礁,且始终为顺时针的旋转潮流。



彩色散点代表绝对误差,左列为分潮的振幅差异,右列为分潮的迟角差异。

The color scatters indicate the absolute error, with the difference in amplitude of the tidal constituents on the left and the difference in phase-lag on the right.

图4 模型结果与卫星高度计调和常数差异的空间分布图

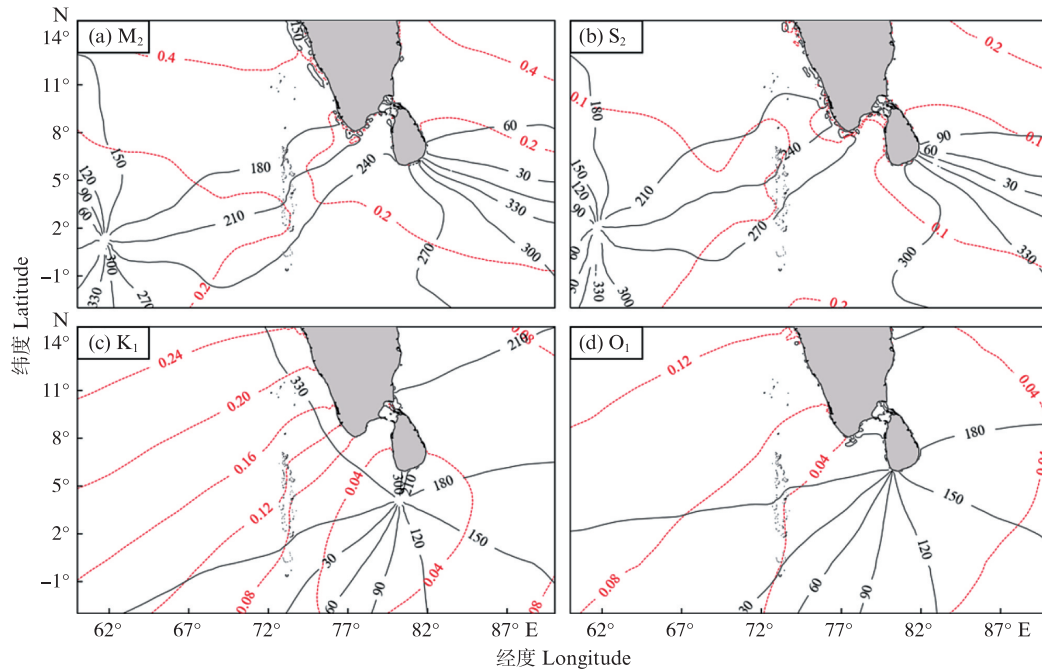
Fig. 4 Spatial distribution of the difference in harmonic constants between model results and satellite altimeter

根据潮流类型指标  $F = (W_{K_1} + W_{O_1}) / W_{M_2}$  作为判断参数<sup>[19]</sup>, 计算得到研究区域内的潮流类型分布图(图8)。由图可知, 研究区域内主要为正规半日潮流和不正规半日潮流。在印度半岛和斯里兰卡的西侧海域为不正规半日潮流, 而在斯里兰卡的东侧海域、阿拉伯海的东北部分海域为正规半日潮流。

平均潮能通量可充分反映潮能的传递情况。图9为4个主要分潮的潮能通量分布图。 $M_2$ 分潮的潮能由西边界进入研究区域, 在印度半岛西海岸的阻挡下, 绕过阿拉伯海南部的无潮点, 向东南方向传播。南下的潮能经过马尔代夫群礁时, 能量被迅速耗散。剩余两股潮能分别汇集在群礁的东西两侧, 随后再次汇合并向东传播, 经过

斯里兰卡南部海域, 最终传播至孟加拉湾。 $S_2$ 分潮的潮能通量分布与 $M_2$ 分潮基本类似, 不同之处在于进入研究区域的潮能相对较小。

$K_1$ 分潮的潮能从西北边界进入研究区域, 在此过程中不受无潮点的阻碍, 潮能顺利向南传播。这些潮能在接近赤道的低纬度海域聚集, 并在斯里兰卡岛南部西向传播, 继而向北传入孟加拉湾, 潮能逐渐耗散。 $O_1$ 分潮的潮能通量分布与 $K_1$ 分潮类似, 其主要区别在于传入研究区域的潮能相对较小。总体而言, 4个分潮的潮能主要通过研究区域的西侧边界传入, 西侧海域的潮能通量高于东侧海域。潮能通量的高值区分布在阿拉伯海南部的非岛礁海岭地带, 低值区分布在近岸以及岛礁海岭区域。



黑实线表示格林尼治世界时等迟时线(单位: °),红虚线表示等振幅线(单位: m)。  
Co-amplitudes (cm) (red dotted line) and co-phase lags (degrees, UTC) (black solid lines).

图5 斯里兰卡邻近海域的同潮图

Fig. 5 Cotidal charts in the adjacent area of Sri Lanka

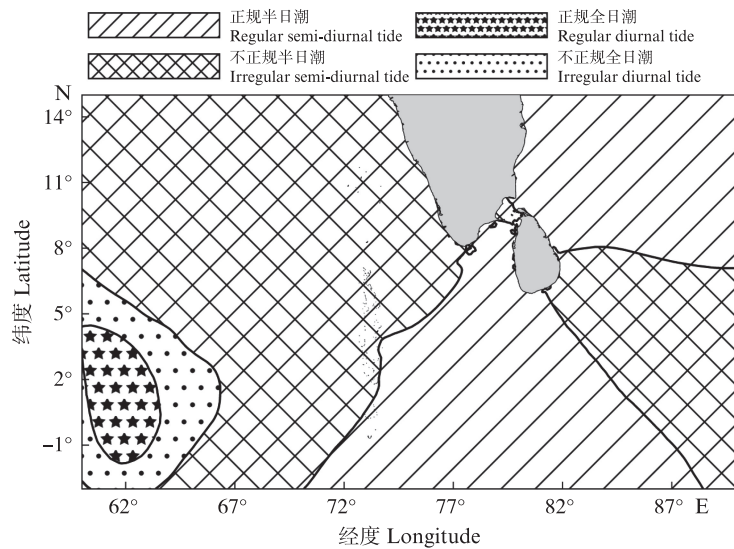


图6 斯里兰卡邻近海域潮汐类型分布图

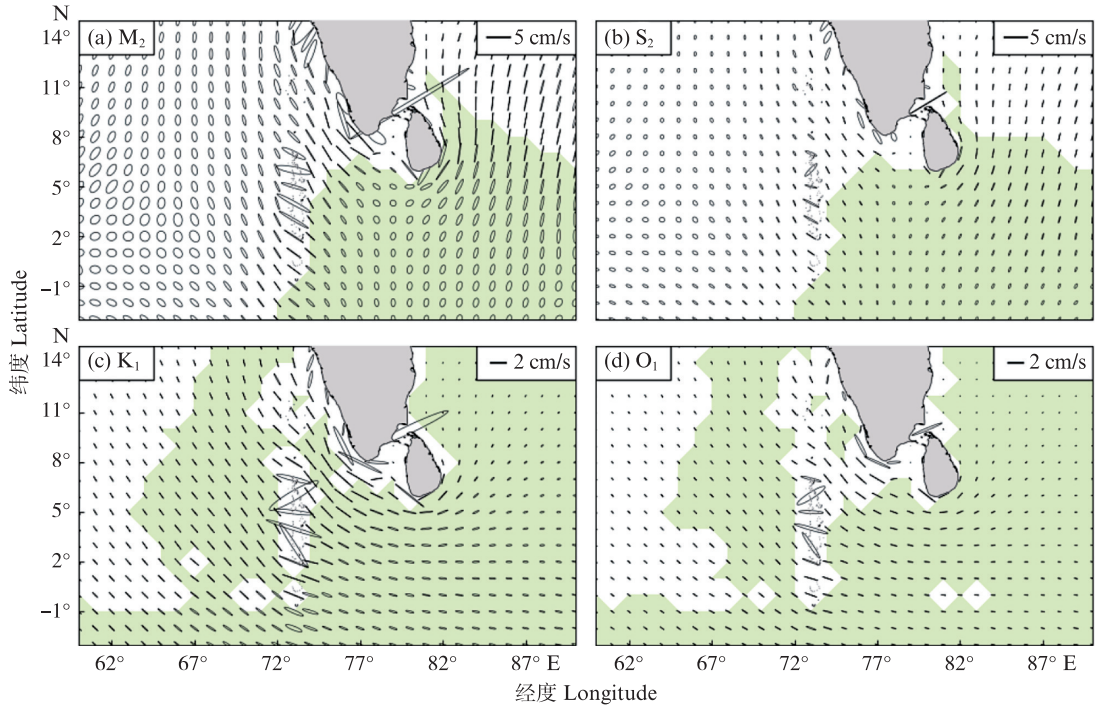
Fig. 6 Tidal type distribution in the adjacent area of Sri Lanka

### 3 讨论

#### 3.1 引潮力对潮汐分布的影响

为具体了解天体引潮力对斯里兰卡海域潮汐模拟的重要性,我们将运动方程中平衡潮项去掉,其余模型设置保持不变,重新模拟并计算得到4个主要分潮的同潮图(图10)。我们发现,天体引潮力对半日潮影响甚微,去掉引潮力后

计算得到的半日潮同潮图(图10a和10b)与去掉前的(图5a和5b)几乎没有差别。但天体引潮力对全日潮的影响十分显著,去掉引潮力后计算得到的全日潮同潮图(图10c和10d)与去掉前的(图5c和5d)相比,潮波系统发生了明显的改变。例如,去掉引潮力的全日潮在海域内没有形成无潮点,分潮振幅明显减小,潮波传播速度明显加快等。



底色为绿色的区域代表椭圆旋转率为正值,表示潮流椭圆逆时针旋转;底色为白色区域代表椭圆旋转率为负值,表示潮流椭圆顺时针旋转。

Green-shaded areas represent positive elliptical rotation rates, indicating counterclockwise tidal ellipse rotation, while white-shaded areas represent negative elliptical rotation rates, indicating clockwise tidal ellipse rotation.

图7 斯里兰卡邻近海域的表层潮流椭圆分布图

Fig. 7 Elliptical maps of surface tidal currents for the tidal constituents in the adjacent area of Sri Lanka

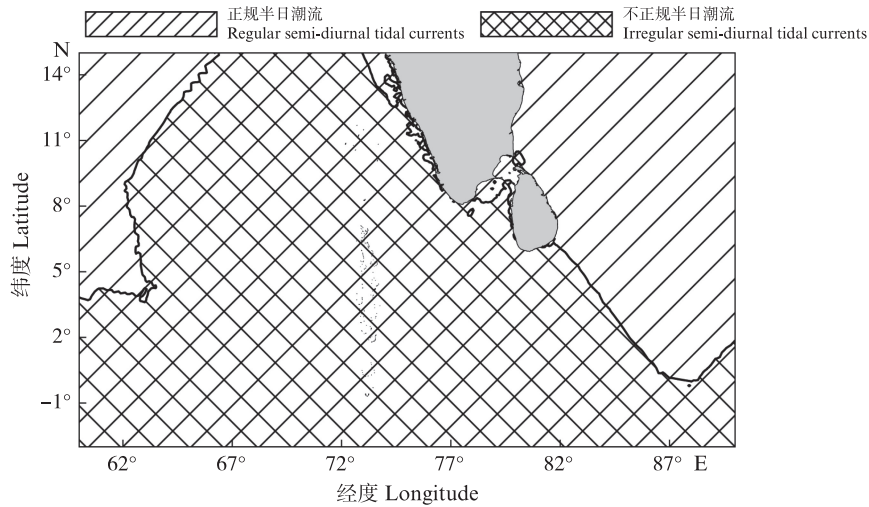
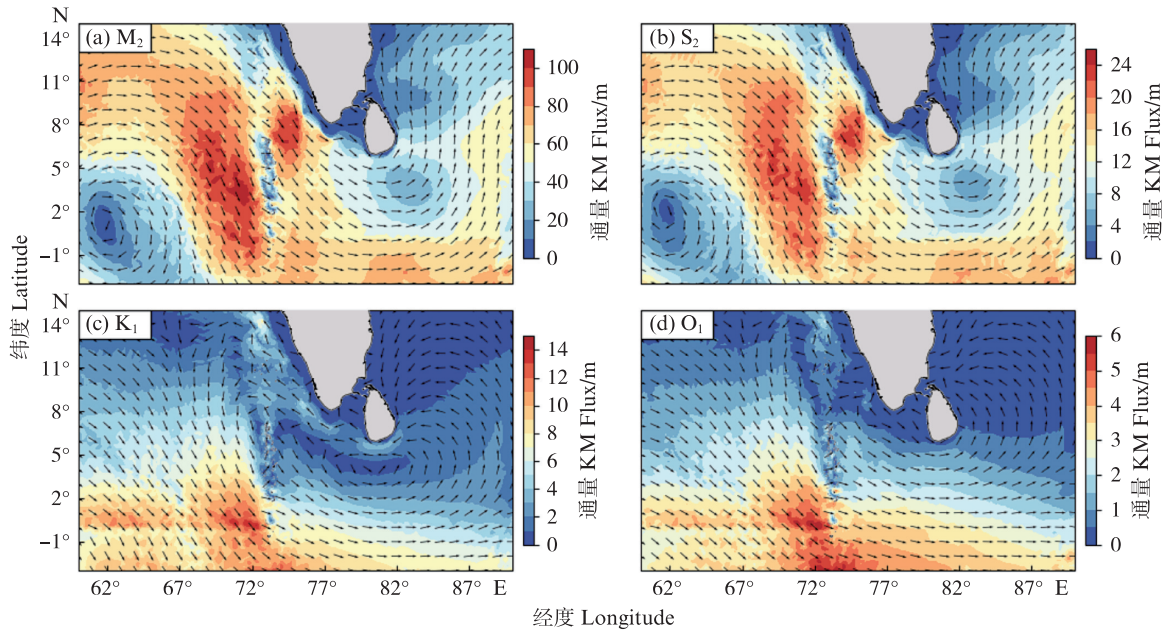


图8 斯里兰卡邻近海域潮流类型分布图

Fig. 8 Tidal currents type distribution in the adjacent area of Sri Lanka





箭头表示潮能通量方向,背景填色表示潮能通量大小。  
The arrows indicate the direction of tidal energy flux, and the background fill colors indicate the magnitude.

图9 斯里兰卡邻近海域的潮能通量分布图  
Fig. 9 Distribution of tidal energy flux in the adjacent area of Sri Lanka

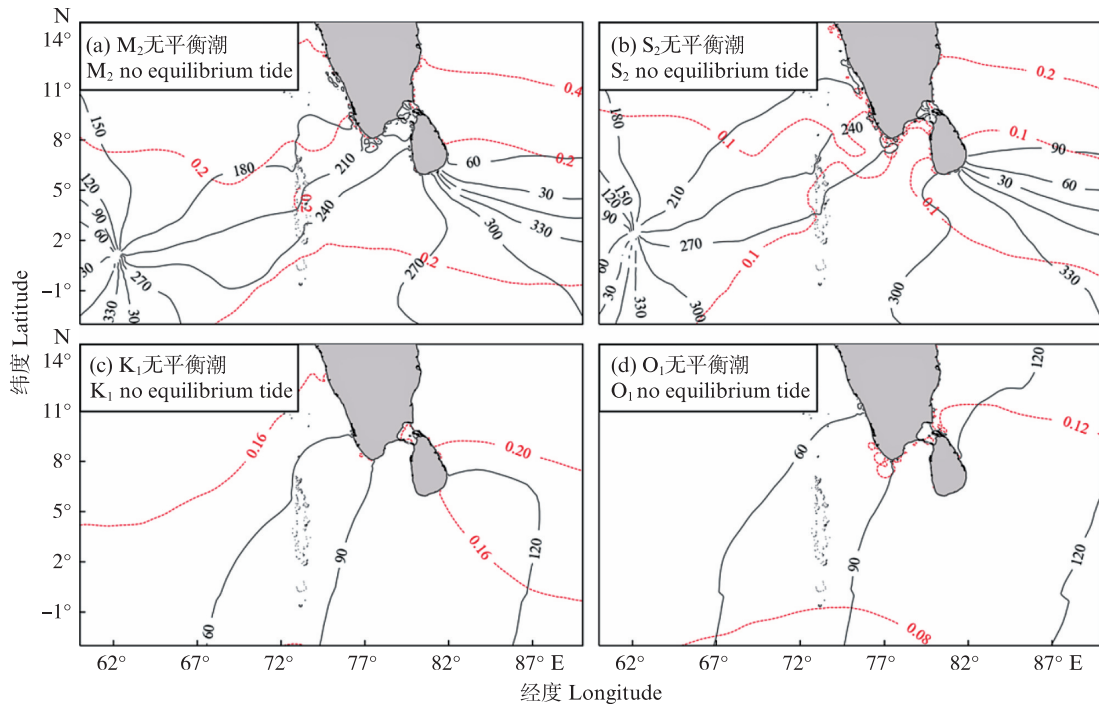


图10 斯里兰卡邻近海域的同潮图(不考虑天体引潮力的作用)

Fig. 10 Cotidal charts in the adjacent area of Sri Lanka (without considering the effect of tidal generating forces)

### 3.2 半日潮和全日潮潮波系统的比较

斯里兰卡邻近海域的半日潮和全日潮存在系统性的差异,主要反映在无潮点的数量、位置,以及潮波传播方向等多个方面。半日潮在海域内形成方向相反的双潮波系统。分潮振幅由无

潮点向外递增,最大值位于阿拉伯海和孟加拉湾两大海湾的湾顶,这一分布特征与PRINGLE等<sup>[11]</sup>的研究结果一致。由于 $S_2$ 和 $M_2$ 分潮的波长和周期相近,两大半日潮的无潮点位置相近。经过对比,模拟得到的半日潮无潮点位置以及潮汐传播

分布特征与 TPX09-atlas-v5 模型的结果(图 11a 和 11b)基本一致。

全日潮在海域内形成逆时针旋转的单潮波系统,分潮振幅最大值位于阿拉伯海顶部。由于  $K_1$  和  $O_1$  分潮波长的差异,两大全日潮的无潮点位置有所不同, $O_1$  分潮的无潮点在  $K_1$  分潮上方。模拟得到的全日潮无潮点位置与 TPX09-atlas-v5 模型的结果(图 11c 和 11d)有所偏差,整体位置产生了向北的偏移。这说明全日潮无潮点位置的影响机制相对半日潮要复杂,有待进一步的探究和改进。根据潮汐类型的计算,研究区域主要为正规半日潮和不正规半日潮,因此以往研究也主要关注  $M_2$  和  $S_2$  两大半日潮。但我们发现,在阿拉伯海, $K_1$  分潮的振幅仅次于  $M_2$  分潮,并显著大于  $S_2$  分潮,并且在半日潮无潮点处,存在着局部的正规全日潮,因此海域内全日潮对水位变化的作用

同样不容忽视。

研究区域内半日潮和全日潮潮波系统结构上的差异,同样反映在潮流和潮能通量的分布上。半日潮在海域内主要表现为旋转潮流,而全日潮则主要表现为往复潮流。与先前的研究相比,半日潮在孟加拉湾顶的流动方向与徐一凯等<sup>[20]</sup>的研究结果一致,但与万荣强等<sup>[12]</sup>的结果不同。结合同潮图进行分析,孟加拉湾海域的潮流方向应大致为 N-S,因此本文得到的潮流椭圆图更符合海域内潮流的行进方向,结果更为可信。在驻潮波中,潮位和流速相位差约为  $\pi/2$ ,通过断面的潮能通量趋近于零,因此无潮点处不传递潮波能量。由于阿拉伯海南部无潮点的阻挡作用,半日潮的潮能主要聚集在马尔代夫群礁的东西两侧,而全日潮的潮能则顺利向南传播,聚集在接近赤道的低纬度海域。

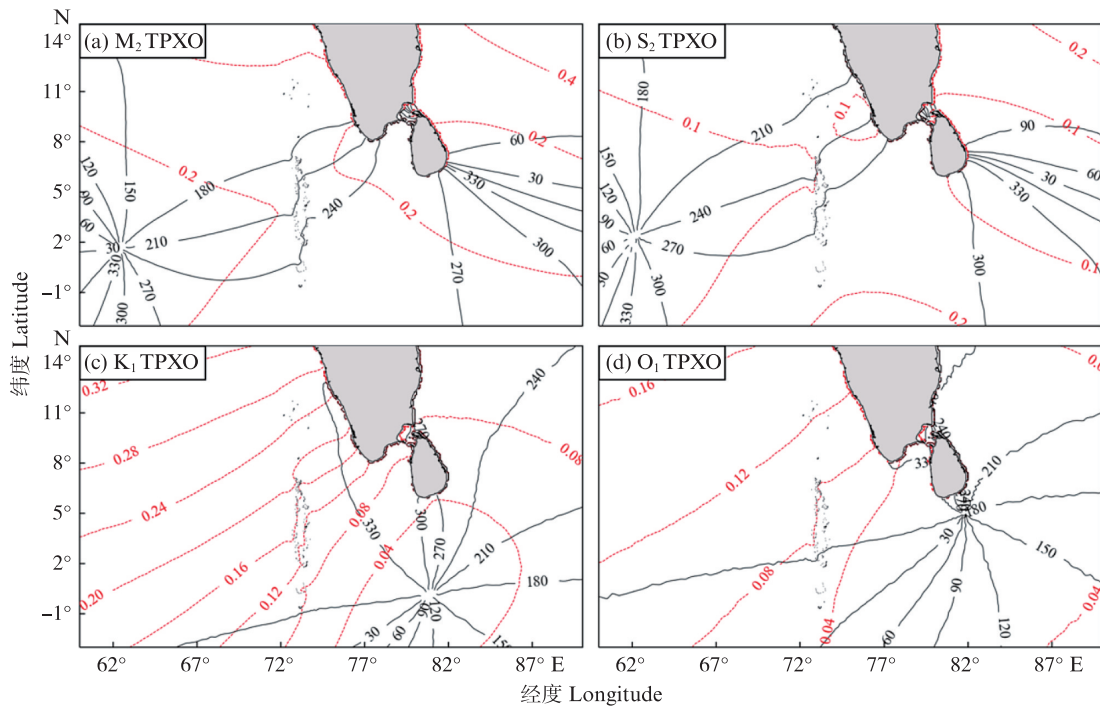


图 11 斯里兰卡邻近海域的同潮图(根据 TPX09-atlas\_v5 模型计算得到)  
Fig. 11 Cotidal charts in the adjacent area of Sri Lanka (calculated from TPX09-atlas\_v5)

### 4 结论

本研究采用 FVCOM 构建三维正压潮汐动力模型,对斯里兰卡邻近海域的潮汐过程进行了研究。根据实测的验潮站水位和卫星调和常数对模型进行评价,模型结果与 5 个验潮站水位的均方根偏差分别为 8.93、6.32、6.52、7.12、

10.18 cm,与 48 个卫星测点调和常数资料的  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  分潮振幅的均方根偏差分别为 2.60、1.71、5.50、2.69 cm,迟角的均方根偏差分别为  $7.28^\circ$ 、 $9.34^\circ$ 、 $18.66^\circ$ 、 $14.65^\circ$ ,结果表明模型与实测资料吻合较好。根据模拟结果,进一步对斯里兰卡邻近海域 4 个主要分潮的潮汐、潮流和潮能通量的分布进行了计算与分析。主要结论

如下:

(1)天体引潮力的作用对海域内全日潮的作用甚大,对半日潮的作用甚微。

(2)斯里兰卡邻近海域的潮汐类型以正规半日潮和不正规半日潮为主,在半日潮的无潮点处,全日潮作用增强。其中在阿拉伯海, $M_2$ 分潮占主导, $K_1$ 分潮次之,全日潮作用不可忽视。

(3)半日潮在研究区域内形成了顺时针和逆时针旋转的双潮波系统,分别分布于海域的西、东两侧,振幅高值区位于阿拉伯海和孟加拉湾顶部;全日潮在斯里兰卡岛南部海域形成了逆时针旋转的单潮波系统,振幅高值区位于阿拉伯海顶部。

(4)半日潮在研究区域内主要表现为旋转流;全日潮主要表现为往复流。4个主要分潮的潮流高值区主要分布在印度半岛西侧沿岸,马尔代夫群礁以及保克海峡。

(5)潮能通量主要由西侧边界进入斯里兰卡邻近海域,平均潮能通量呈现西高东低的分布特征。半日潮的潮能聚集在马尔代夫群礁的东西两侧,全日潮的潮能聚集在赤道附近。4个主要分潮的平均潮能通量低值区均分布在近岸、无潮点以及马尔代夫群礁地区。

#### 参考文献:

- [1] DU Y Q, CHEN Q S, LAM J S L, et al. Modeling the impacts of tides and the virtual arrival policy in berth allocation[J]. *Transportation Science*, 2015, 49(4): 939-956.
- [2] AHN J E, RONAN A D. Impact of discrepancies between global ocean tide models on tidal simulations in the Shinnecock Bay area [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2019, 145 (2) : 04018042.
- [3] KIM C S, CHO Y K, CHOI B J, et al. Improving a prediction system for oil spills in the Yellow Sea: effect of tides on subtidal flow [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 68(1/2): 85-92.
- [4] 宣莉莉,邱云,许金电,等. 热带东印度洋表层环流季节变化特征研究[J]. *热带海洋学报*, 2014, 33(1): 26-35.
- XUAN L L, QIU Y, XU J D, et al. Seasonal variation of surface-layer circulation in the eastern tropical Indian Ocean [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2014, 33 (1): 26-35.
- [5] LEE S H, CHANG Y S. Classification of the global tidal types based on auto-correlation analysis [J]. *Ocean Science Journal*, 2019, 54(2): 279-286.
- [6] MERRIFIELD M A, FIRING Y L, AARUP T, et al. Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26, 2004 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32 (9): L09603.
- [7] VINOGRADOV S V, PONTE R M. Low-frequency variability in coastal sea level from tide gauges and altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116 (C7): C07006.
- [8] CARTWRIGHT D E, RAY R D. Oceanic tides from Geosat altimetry [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1990, 95(C3): 3069-3090.
- [9] STAMMER D, RAY R D, ANDERSEN O B, et al. Accuracy assessment of global barotropic ocean tide models [J]. *Reviews of Geophysics*, 2014, 52(3): 243-282.
- [10] MAAS L R M, AGUIAR-GONZÁLEZ B, PONSONI L. Deep-ocean tides in the South-West Indian Ocean: comparing deep-sea pressure to satellite data [M]// VELARDE M G, TARAKANOV R Y, MARCHENKO A V. *The Ocean in Motion: circulation, Waves, Polar Oceanography*. Cham: Springer, 2018: 147-182.
- [11] PRINGLE W J, WIRASAET D, SUHARDJO A, et al. Finite-Element barotropic model for the Indian and Western Pacific Oceans: tidal model-data comparisons and sensitivities[J]. *Ocean Modelling*, 2018, 129: 13-38.
- [12] 万荣强,魏泽勋,高秀敏,等. 北印度洋半日潮波的数值模拟研究[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 562-573.
- WAN R Q, WEI Z X, GAO X M, et al. Numerical simulation of semi-diurnal tidal waves in the northern Indian Ocean[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38 (4): 562-573.
- [13] 李雨. 潮流数值模拟在斯里兰卡汉班托塔港人工岛设计中的应用[J]. *中国水运*, 2018, 18(5): 70-72, 94.
- LI Y. Study and application of tidal current numerical simulation in the design of artificial island in Hambantota Port, Sri Lanka [J]. *China Water Transport*, 2018, 18 (5): 70-72, 94.
- [14] KODITHUWAKKU R K K A SN, LI Y N, PENG S Q, et al. Characteristics of Tide-Surge Interaction along Sri Lanka Coast: a case study [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 10(3): 342-352.
- [15] SCHWIDERSKI E W. On charting global ocean tides [J]. *Reviews of Geophysics*, 1980, 18(1): 243-268.
- [16] CHEN C S, BEARDSLEY R C, COWLES G, et al. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model: FVCOM user manual[R]. 3rd ed. 2011.
- [17] PUGH D T, ABUALNAJA Y, JAROSZ E. The tides of the red sea [M]//RASUL N M A, STEWART I C F.

- Oceanographic and Biological Aspects of the Red Sea. Cham: Springer, 2019: 11-40.
- [18] 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.
- [19] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005.
- HUANG Z K, HUANG L. Tidal theory and calculation [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005.
- [20] 徐一凯, 胡松, 朱宇航, 等. 孟加拉湾陆架对潮汐的影响研究[J]. 热带海洋学报, 2023, 42(3): 67-74.
- XU Y K, HU S, ZHU Y H, et al. Impacts of continental shelf on tide in the Bay of Bengal [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2023, 42(3): 67-74.

## Numerical simulation of tides and tidal currents in the adjacent area of Sri Lanka

TAN Yang, GAO Guoping, DENG Chuangwu, XU Ruicheng, LI Shikai

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

**Abstract:** To gain a comprehensive understanding of the distribution patterns and physical mechanisms of tidal currents in the adjacent area of Sri Lanka, this study utilized the Finite-volume community ocean model (FVCOM) to establish a detailed three-dimensional barotropic tidal dynamics model. The model was used to simulate and analyze the tidal characteristics of the four major tidal constituents ( $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ) within the study area. By comparing the numerical simulation results with tidal gauge data and satellite altimeter harmonic constants, the model's reliability and the feasibility of the simulation scheme were confirmed. Based on the computational results, distribution maps of tides, tidal currents, and tidal energy fluxes for the four major tidal constituents in the adjacent area of Sri Lanka were produced. The study also explored the influence of tidal generating forces on tidal distribution and compared the structural differences between semidiurnal and diurnal tidal systems. The results indicate that the study area is predominantly characterized by regular and irregular semidiurnal tides, with significant contributions from tidal generating forces to the diurnal tides. Systematic differences were observed between semidiurnal and diurnal tides: semidiurnal tides form two counter-rotating tidal wave systems, while diurnal tides form a single counterclockwise tidal wave system; semidiurnal tidal currents are primarily rotational, whereas diurnal tidal currents exhibit reciprocating flow patterns. The mean tidal energy flux showed a distribution trend of higher values in the west and lower values in the east, with semidiurnal tidal energy concentrated on the east and west sides of the Maldives reefs and diurnal tidal energy concentrated near the equator. This study enhances the understanding of tidal characteristics in the Sri Lankan area and, for the first time, examines the impact of tidal generating forces on tidal distribution in this region.

**Key words:** tides; tidal currents; numerical simulation; FVCOM; Sri Lanka