

钟皓, 周洁琼, 吴自银, 等. 台湾海峡水沙数值模拟与地貌冲淤分析[J]. 海洋学报, 2024, 46(4): 90–105, doi:10.12284/hyxb2024041  
Zhong Hao, Zhou Jieqiong, Wu Ziyin, et al. Numerical simulation of hydrodynamic and sediment transport and analysis of geomorphic erosion and deposition in the Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(4): 90–105, doi:10.12284/hyxb2024041

# 台湾海峡水沙数值模拟与地貌冲淤分析

钟皓<sup>1</sup>, 周洁琼<sup>1,2\*</sup>, 吴自银<sup>1,2,3</sup>, 赵荻能<sup>1,2</sup>, 曹振轶<sup>1,4</sup>, 朱超<sup>3</sup>

(1. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2. 自然资源部海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 上海交通大学海洋学院, 上海, 200030; 4. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 台湾海峡是我国最大的海峡, 也是东海和南海进行物质和能量交换的主要通道。海峡内地形变化剧烈, 海洋动力环境复杂, 加上两侧众多山溪性河流携带大量泥沙流入海洋, 是研究动力沉积作用的理想场所。目前, 由于缺乏海峡整体的高分辨率地形以及相关实测水文数据, 以整个台湾海峡为研究区域的动力沉积模拟尚不多见。本文基于高分辨率地形和相关水文数据, 建立了台湾海峡水动力数值模型, 耦合泥沙输运模块, 模拟台湾海峡的动力沉积过程, 并用现场观测资料对模型进行了验证。动力模拟结果表明, 台湾海峡的潮流流场由南、北两个潮波控制, 具有明显的时间和空间特征, 潮流流速夏季大于冬季, 海峡中部小于南北两侧, 北侧小于南侧。基于冲淤模拟结果, 将台湾海峡划分为淤积区、侵蚀区、冲淤平衡区三大类共计 7 个沉积分区, 淤积区沉积速率最大可达 5 cm/a, 主要集中在台湾浅滩北部, 侵蚀区冲刷速率为 2~5 cm/a。结合模拟结果, 本文建立了台湾海峡沉积输运模式与“源-汇”格局模式, 阐述了台湾海峡冲淤变化的动力学机制和“源-汇”过程。

**关键词:** 台湾海峡; 数值模拟; 水动力; 泥沙输运; 地貌演变

中图分类号: P736.21<sup>†3</sup>

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)04-0090-16

## 1 引言

海峡作为地球上重要的地理特征之一, 其在不同海域水体的物质交换、热量传递及生态系统的互动中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。全球各地海峡类型丰富多样, 由于海峡通常是重要的海上通道, 它们不仅具有连接不同水域的作用, 还承担着重要的国际贸易航道和地缘战略作用, 其安全与稳定对世界各国经济和国际关系有着直接的影响。从地质演化和古气候学的角度看, 海峡的形成或关闭会对地球表面的大洋环流和大气环流产生深刻影响, 进而导致全球气候变化<sup>[2]</sup>。研究海峡的水动力、地形演变与气候变化的相互关

系, 不仅有助于深入理解地球系统的运行机制, 也能为理解古代气候变化提供重要线索。

我国近海较大的海峡由北向南依次为渤海海峡、台湾海峡和琼州海峡, 与中国东部陆架以及黄河、长江三角洲相比, 对这些海峡沉积动力和沉积特征的研究还明显不足<sup>[3]</sup>。渤海海峡连接渤海和黄海, 前人通过对海峡内分布的若干水道和大量的潮汐沙脊与浅滩沙脊研究, 认为潮流是渤海海峡沉积物的主要搬运方式<sup>[4-5]</sup>。琼州海峡连接南海和北部湾, 是南海潮流最强的区域, 为典型的潮控海峡<sup>[5]</sup>。与渤海和琼州海峡不同, 台湾海峡同时受海流、潮流<sup>[6-7]</sup>和台湾岛重力流<sup>[8]</sup>的影响, 沉积动力复杂。因此, 有必要针对台湾海峡

收稿日期: 2023-12-17; 修订日期: 2024-03-27。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41830540); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(QNYC2403, JG2303); 上海交通大学深蓝计划项目(SL2020ZD204, SL2022ZD205, SL2023ZD102); 浙江省自然科学基金项目(LY23D060007); 东海实验室开放基金项目(DH-2022KF01005)。

**作者简介:** 钟皓(2000—), 男, 江西省赣州市人, 主要从事台湾海峡水动力与泥沙输运数值模拟研究。E-mail: 1759223156@qq.com

\* **通信作者:** 周洁琼(1990—), 女, 福建省南平市人, 博士, 副研究员, 研究方向为海底动力地貌探测与研究。E-mail: janezhou@sio.org.cn

的现代动力特征和沉积演化开展研究。

作为我国最大的海峡,台湾海峡含沙量巨大,被认为是世界上输沙产出最高的地区之一<sup>[9]</sup>。海峡内地形变化起伏大,加之风大、浪高、流急,使得水动力成为影响该地区沉积物输运的主要因素。由于台湾海峡重要的地理位置和复杂的动力环境,许多学者利用现代观测、数值模拟等手段对其水动力条件与地形地貌进行研究。早期对台湾海峡的研究主要是通过潮汐表等观测资料的分析,讨论海峡潮汐和潮流的分布特征<sup>[6-7, 10-11]</sup>。随着计算机硬件、软件技术的快速发展,数值模拟逐渐成为研究海洋动力和泥沙输运的主要手段<sup>[12-13]</sup>。许多学者利用 Delft3D、MIKE 等区域数值模型对台湾海峡西岸的海湾<sup>[14-16]</sup>、河口<sup>[17]</sup>等泥沙输入较大的区域进行模拟,探讨其沉积动力特征和沉积演化。然而,由于实测地形资料的缺乏,加上泥沙模型涉及的参数众多,率定存在一定的困难,针对整个台湾海峡的沉积动力和泥沙输运特征的研究还不够深入<sup>[18-20]</sup>,导致对于台湾海峡区域现代沉积格局以及源-汇过程等关键科学问题的理解尚需进一步深入。

针对上述科学问题,本文基于台湾海峡高分辨率地形和实测水文数据,构建二维水动力模型,分析台湾海峡的水动力特征,进一步耦合泥沙输运模块,研究台湾海峡全区沉积物输运特征,在此基础上,探讨台湾海峡现代沉积体系的发育演化。

## 2 研究区域概况

台湾海峡位于中国大陆东南沿海和台湾岛之间,和琼州海峡、渤海海峡并称为中国近海三大海峡,是一个东北-西南走向的狭长水道。海峡南界为台湾岛南端鹅銮鼻与广东省南澳岛南端之间连线;北界为台湾岛北端富贵角与福建省平潭岛之间连线,区域范围为 22°~26°N, 116.5°~121.5°E。海峡内东西两侧 20~30 m 等深线基本平行于岸线<sup>[21]</sup>,海峡中部地形复杂,发育有“两正两负”4 个不同的地形单元<sup>[22]</sup>。台中浅滩和台湾浅滩平均深度为 20~30 m<sup>[23]</sup>,前者位于台湾海峡中东部,后者位于台湾海峡西南部。两个相对较深的地形单元为澎湖水道和吴楚凹陷(图 1)。

台湾海峡具有典型的热带季风气候特征,冬季盛行东北季风,夏季盛行西南季风。受强劲季风影响,海峡内波浪具有明显的季节特点,冬季盛行较强的东北向浪,夏季盛行弱的西南向浪<sup>[24]</sup>,然而,由于台风事件,波高最大值通常出现在夏季<sup>[25]</sup>。台湾海峡海流由浙闽沿岸流、台湾暖流和南海暖流组成(图 1)。在季风的控制下,海峡内环流呈季节性变化<sup>[26-28]</sup>,夏季由

黑潮支流台湾暖流占主导,春、秋、冬季主要为南下的浙闽沿岸流<sup>[29]</sup>。受海峡复杂地理环境影响,海峡潮汐性质比较复杂,是中国典型的大潮区之一<sup>[3]</sup>。台湾海峡北口至澎湖列岛为规则半日潮,澎湖列岛以南为不规则全日潮和不规则半日潮<sup>[30]</sup>,海峡内潮流主要受东海传入的潮波控制<sup>[31]</sup>。在强劲的季风作用下,加上波浪、海流、潮流合力和助推作用,台湾海峡底部沉积物处于不断变动的状态。

台湾海峡两岸分布着众多中、小型山溪性河流,这些河流每年携带大量沉积物进入台湾海峡,是台湾海峡重要的物质来源<sup>[32-34]</sup>。其中泥沙输入量较大的河流包括海峡西侧的闽江、九龙江、韩江以及海峡东侧的曾文溪、浊水溪和高屏溪(图 1),此外长江的部分泥沙也会在浙闽沿岸流的搬运下输入台湾海峡。大部分河流泥沙沉积物在春季和夏季沉积在河口附近<sup>[35-36]</sup>,然后在冬季强烈的潮流驱动下输送到台湾海峡<sup>[37]</sup>。海峡两岸主要河流年平均径流量及输沙量数据主要来自《中国河流泥沙公报》《台湾水位流量册》以及相关文献提取(表 1)。

## 3 数据与方法

### 3.1 主要数据来源

Mike 21 数值模型的建立所需数据主要为以下 3 类:(1)模型运行背景数据;(2)模型动力条件数据;(3)模型验证数据。

模型运行背景数据主要为岸线、水深数据。岸线数据来自 GSHHG(A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database)(<https://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg>),是一个由世界矢量海岸线(WVS)、CIA 世界数据库 II(WDB II)和冰冻圈地图集(AC)合并而成的高分辨率地理数据集。水深数据来自 GEBCO\_2022\_Grid([https://www.gebco.net/data\\_and\\_products/gridded\\_bathymetry\\_data](https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data)),它是海洋和陆地的全球地形模型,空间分辨率为 15 弧秒,是目前网上可以公开下载的分辨率最高的地形数据,结合电子海图和台湾海峡实测多波束资料进行校正。

模型动力条件数据包括风场、河流径流量及输沙量、边界条件。风场数据来自欧洲天气预报中心(ECMWF)于 2016 年发布的 ERA5 数据集,选取研究区 2022 年全年 10 m 的  $u$  风分量和 10 m 的  $v$  风分量制作所需的风场文件,风场空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,时间分辨率为 1 h。河流径流及输沙数据来源前文已述(表 1)。边界条件数据同样来自 ERA5 数据集,提取相关数据

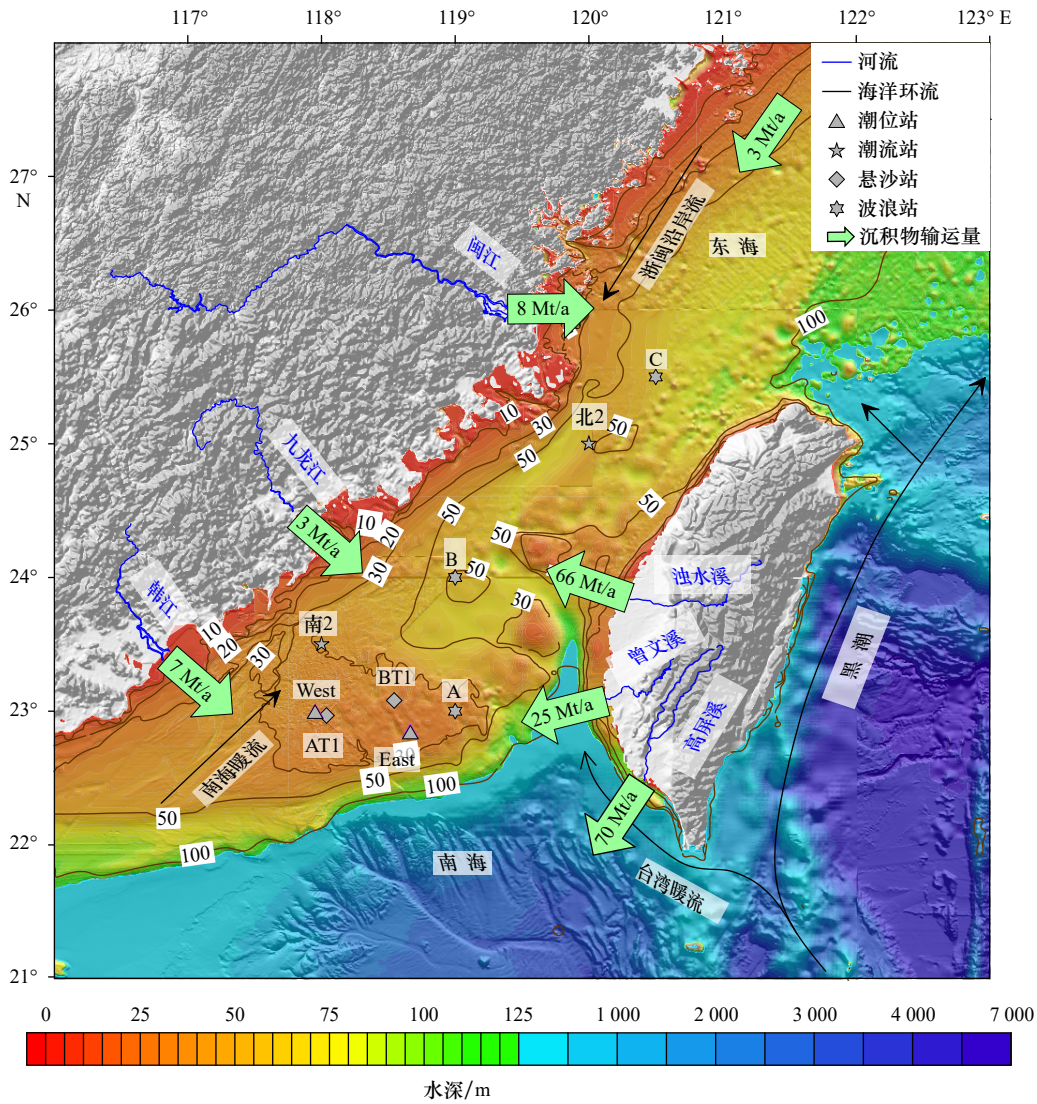


图 1 台湾海峡地形及测站分布图<sup>[38]</sup>

Fig. 1 Topography map of the Taiwan Strait and the locations of the monitoring stations

表 1 台湾海峡两岸主要河历年径流量及输沙量

Table 1 Annual runoff and sediment discharge of the major rivers on both sides of the Taiwan Strait

河流	年径流量/m <sup>3</sup>	年输沙量/Mt
闽江	$4.00 \times 10^{10}$	8 <sup>[22]</sup>
九龙江	$1.50 \times 10^{10}$	3 <sup>[22]</sup>
韩江	$2.45 \times 10^{10}$	7 <sup>[22]</sup>
长江	—	3 <sup>[39]</sup>
浊水溪	$4.39 \times 10^{10}$	66 <sup>[22]</sup>
曾文溪	$2.36 \times 10^{10}$	25 <sup>[40]</sup>
高屏溪	$7.00 \times 10^{10}$	70 <sup>[22]</sup>

制作成 MIKE 所需的边界条件。

模型验证数据包括水文数据、波浪数据、悬沙数

据。水文数据部分来自 2022 年台湾浅滩地形与水文调查航次,另一部分潮流数据来自国家海洋信息中心发布的潮汐表;波浪验证数据来自欧洲天气预报中心 (ECMFW) 发布的 ERA5 数据集;悬沙浓度数据来自海洋公益性行业科研专项,相关数据的采集位置信息见图 1。

### 3.2 模型构建

本文采用由丹麦水力研究所开发的 MIKE21FM 二维平面数学模型,该模型可用于模拟河流、湖泊、海岸及海洋的水流、波浪、泥沙。目前该软件的应用十分广泛,在长江口综合治理、南水北调、香港机场等大型工程中都得到了应用<sup>[41]</sup>。考虑到台湾海峡全区范围较大且属于浅水海峡,三维模型计算得出的垂向各层流速与二维模型计算的垂向平均流速差异不大,且三维模型相比二维模型计算时间更长,因此本

文选用 MIKE21FM 进行台湾海峡的水动力及泥沙输运数值模拟。

### 3.2.1 MIKE21FM 水动力与泥沙输运求解方程

本文采用 MIKE21FM 中 HD、SW、MT 和 ST 4 个模块进行研究区的水动力、波浪和泥沙计算, 4 个模块的主要方程组包括以下几个部分<sup>[41]</sup>:

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS. \quad (1)$$

x 方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = & f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \\ & \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S. \end{aligned} \quad (2)$$

y 方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = & -f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{yy}}{\rho_0} - \\ & \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,

$$h\bar{u} = \int_d^\eta u dz, \quad h\bar{v} = \int_d^\eta v dz,$$

式中,  $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$  为基于水深平均的流速;  $t$  为时间;  $x$ 、 $y$  为笛卡儿坐标系坐标;  $\eta$  为水位;  $d$  为静止水深;  $h = \eta + d$  为总水深;  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的速度分量;  $f$  是科氏力参数,  $f = 2\omega \sin \phi$ ,  $\omega$  为地球自转角速度,  $\phi$  为当地纬度;  $g$  为重力加速度;  $\rho$  为水的密度;  $s_{xx}$ 、 $s_{xy}$ 、 $s_{yy}$  分别为辐射应力分量;  $S$  为源项;  $u_s$ 、 $v_s$  为源项水流流速;  $T_{ij}$  为水平黏滞应力项, 包括黏应力、紊流应力和水平对流。

波能守恒方程:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (vN) = \frac{S}{\sigma}, \quad (4)$$

其中,

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma, \quad S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf},$$

式中,  $N$  为动谱密度;  $E$  为能谱密度;  $v$  为波浪速度;  $S$  为源项, 主要包括风能输入、非线性波波相互作用、白帽耗散、底摩擦耗散和深度诱导破碎耗散五项。

MT 泥沙输运扩散方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = & \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left( hD_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \\ & \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left( hD_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + Q_L C_L \frac{1}{h} - S, \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $\bar{c}$  为泥沙平均浓度;  $D_x$ 、 $D_y$  为扩散系数;  $S$  为侵

蚀或者淤积的源项;  $Q_L$ 、 $C_L$  分别表示单位水平区域内点源排放量及点源排放浓度。

ST 泥沙连续方程:

$$-(1-n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \nabla S, \quad (6)$$

式中,  $n$  为底床孔隙率;  $\partial z / \partial t$  为底床变形速率;  $\partial S_x / \partial x$  为输沙率  $x$  向梯度;  $\nabla S$  为源汇。

### 3.2.2 计算域及网格、水深

模型计算范围为台湾海峡及周边海域 ( $21^\circ \sim 26^\circ \text{N}$ ,  $116^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ ), 考虑到澎湖水道水深梯度太大, 因此模型的计算范围包括了台湾海峡周边海域, 以避免水深梯度过大造成模型计算发散。模型采用直角坐标系生成贴合岸线的非结构网格, 整个模型由 7 064 个节点和 13 138 个单元组成, 网格空间步长为 5 km (图 2)。

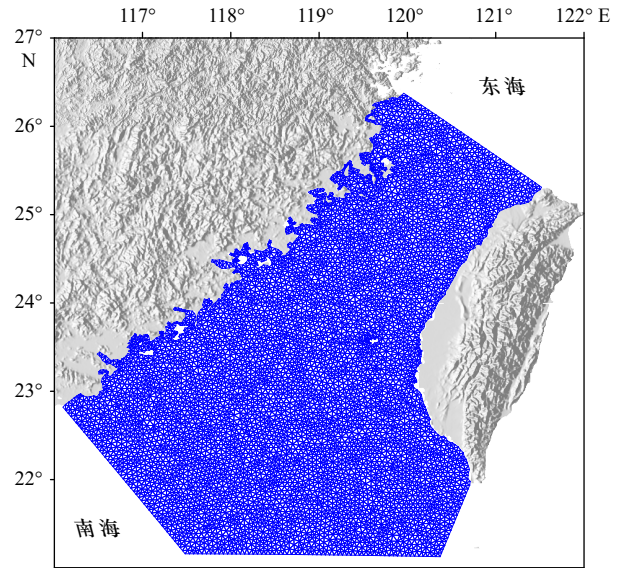


图 2 计算域网格

Fig. 2 Mesh of the computational domain

### 3.2.3 参数设置

模型考虑风场、波浪辐射应力以及河流径流、输沙等因素, 相关数据制作成模式要求格式输入到模型中。水动力模块的外海开边界采用水位、流速边界条件, 水位边界采用 MIKE21FM 自带的潮汐数据库生成, 流速边界从 ECWMF 发布的 ERA5 数据集提取; 波浪模块采用波浪三要素 (有效波高、平均波向、谱峰周期) 作为边界条件。陆地边界条件采用闭边界条件, 即边界上水质点的法向流速为 0。

为保证模型计算稳定, 时间步长的设置需满足 CFL 条件, 时间步长为 300 s, 模拟时间为 2022/01/01/00:00—2022/12/31/23:00, 共 105 108 个时间步长。为避免模型计算出现不稳定, 干湿水深判别设置为干

水深 0.005 m, 淹没水深 0.05 m, 湿水深 0.1 m。曼宁系数经过多次率定, 变化范围在 25~45 m<sup>1/3</sup>/s。泥沙模块中将泥沙组分设为 1 组, 泥沙层数设为 1 层; 模型考虑泥沙的絮凝沉降, 将絮凝条件设为 0.01 kg/m<sup>3</sup>; 沉降速度采用 Stokes 沉降公式计算, 经过多次率定后取值 0.005 m/s; 泥沙密度设为常数 2 650 kg/m<sup>3</sup>。临界侵蚀剪切应力和临界淤积剪切应力大多依赖经验公式, 较难准确获取, 需要靠经验和多次测试进行率定及调整。台湾浅滩、台中浅滩初始泥沙层厚度设为 10 m, 其他地区设为 1 m。模型重要参数如表 2 所示。

表 2 模型重要参数

Table 2 Model parameter setting

HD模块参数	参数设置	SW模块参数	参数设置
科氏力参数	随空间变化	求解方程	全谱、非定常公式
水平涡黏系数	0.28 m <sup>2</sup> /s	空气-海水作用方式	耦合
糙率	随水深变化 25~45 m <sup>1/3</sup> /s	波浪破碎系数	0.8
风阻	0.001 255	底摩擦系数	Johnson公式
波浪辐射应力	根据SW计算 结果输入	白帽耗散	Komen公式
MT模块参数	参数设置	ST模块参数	参数设置
泥沙密度	2 650 kg/m <sup>3</sup>	泥沙输运表	MIKE工具箱生成
临界淤积剪切应力	率定获得	泥沙孔隙率	0.4
临界侵蚀剪切应力	率定获得	中值粒径	0.6 mm
底摩擦系数	率定获得	分选系数	1.1
水平涡黏系数	1 m <sup>2</sup> /s	波浪辐射应力	根据SW计算 结果输入

## 4 结果

### 4.1 模型验证

本文建立了台湾海峡及周边海域二维水动力数学模型和泥沙输运模型, 为确保模型模拟结果的准确性, 分别对模型的潮位、潮流、波浪三要素以及悬沙浓度进行验证。验证数据来源在 3.1 节已介绍。

潮位、潮流的模拟值与实测值整体趋势相一致, 总体吻合良好, 其中北 2 站和南 2 站, 由于潮汐表的流速是表层流速, 模型验证的流速为全水深平均流速, 所以略有差异 (图 3, 图 4)。A、B 站波浪三要素的模拟值与实测值吻合良好, C 站的误差较大, 可能是由于 C 站位置靠近模型边界所致 (图 5)。悬沙浓度模拟值与实测值相比较低 (图 6), 可能由于沉积物输运模块中只考虑了单一泥沙组分, 所以导致悬沙浓

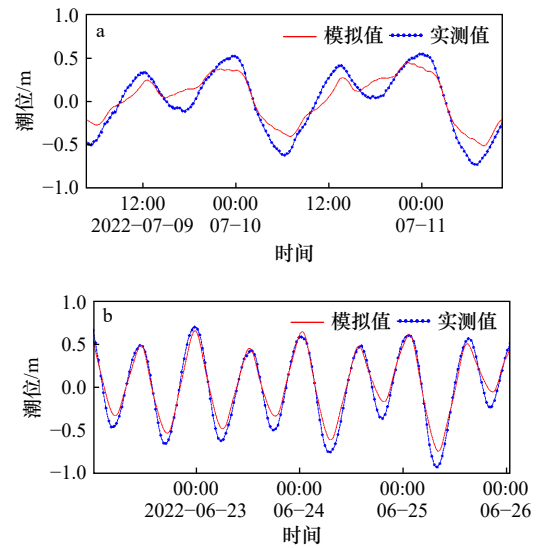


图 3 East 站(a)和 West 站(b)的潮位验证

Fig. 3 Validation of tidal levels at stations East (a) and West (b)

度低于实测值, 并且悬沙浓度的计算中有很大的不确定性和许多估算的参数, 其模拟误差往往比潮位潮流的更大<sup>[42]</sup>, 悬沙浓度的模拟值与实测值始终保持在同一量级且有相似的趋势, 可以证明模型在泥沙输运过程中具有较高的可信度。

为保证模型模拟结果的准确性和有效性, 本文采用相关系数 (Cor)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 3 种数理统计指标进行统计分析, 各站点的数理统计指标见表 3。除波浪的 C 站点, 其他站点的相关系数良好, 均在 70% 以上, 相关性系数较差的 3 个站点原因前文已述; 从平均绝对误差和均方根误差来看, East 和 West 两个站点的流向误差较大, 原因是两个站流向模拟值与实测值时间上存在一定的滞后, 这对模型水动力计算结果的影响并不大。

综合各站潮位、潮流、波浪以及悬沙浓度模拟结果与实测值的对比和误差分析, 本文的水动力及泥沙输运模型误差在合理范围之内, 模型能够比较准确地模拟台湾海峡内的水动力及悬沙情况, 其结果可用于进一步的分析。

### 4.2 潮流特征

潮流是影响泥沙运移的重要动力因素, 通过对台湾海峡潮流场的数值模拟, 可以研究台湾海峡内泥沙运移和沉积物分布与潮流作用之间存在的联系。由于台湾海峡内潮流受强烈的季风作用, 全年可分为冬季 (东北风) 和夏季 (西南) 两大季风期, 本文以 6 月和 12 月分别作为夏季和冬季的代表月, 分析台湾海峡一个大潮周期内的流场变化 (图 7)。

夏季 (图 7a), 台湾海峡内盛行西南季风, 涨急时,

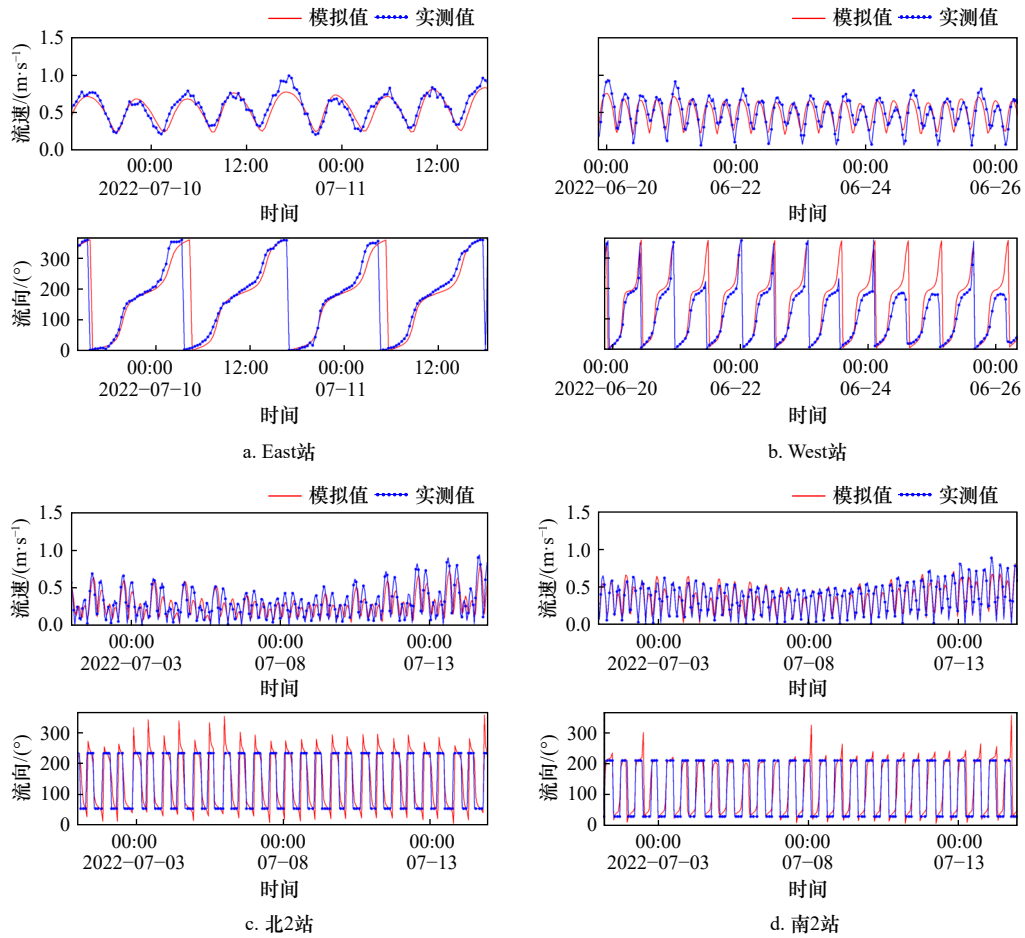


图4 East站(a)、West站(b)、北2站(c)、南2站(d)的流速、流向验证

Fig. 4 Validation of flow velocity and direction at stations East (a), West (b), North 2 (c), South 2 (d)

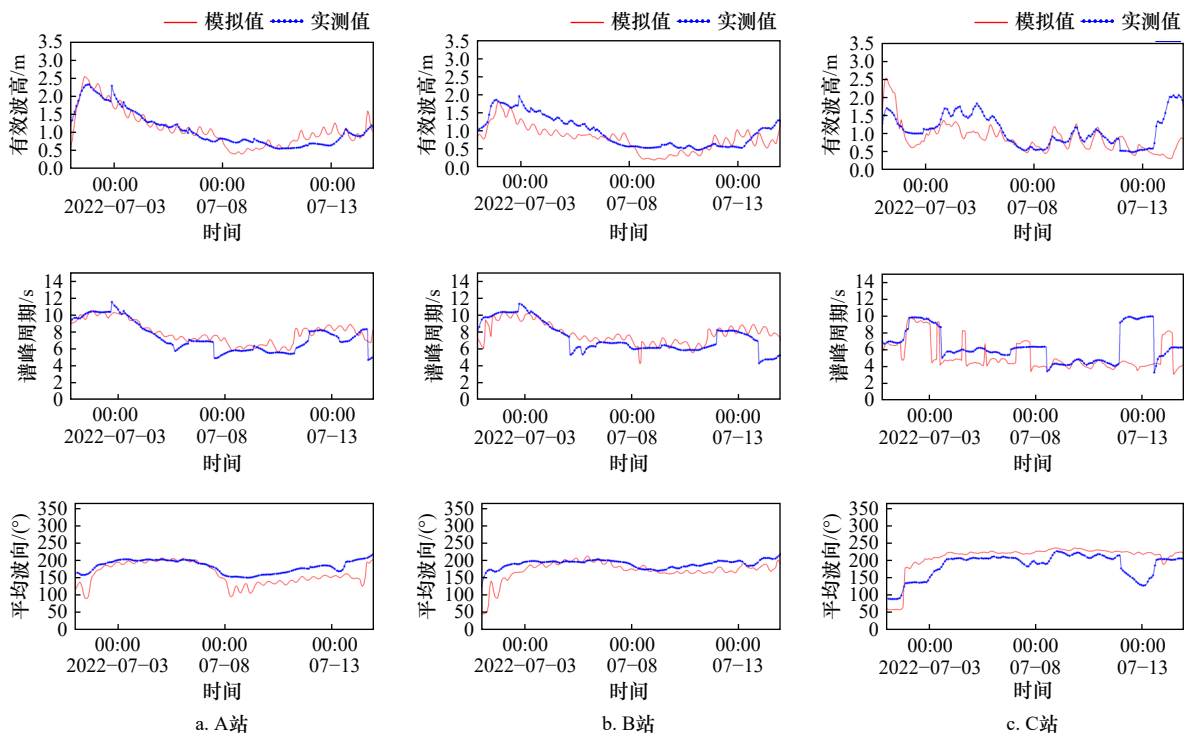


图5 A站(a)、B站(b)、C站(c)的有效波高、谱峰周期、平均波向验证

Fig. 5 Validation of significant wave height, spectral peak period, and mean wave direction at stations A (a), B (b), C (c)

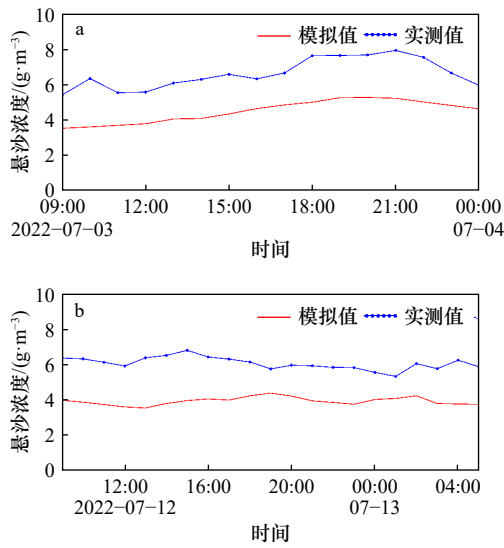


图6 AT1站(a)、BT1站(b)的悬沙浓度验证

Fig. 6 Validation of suspended sediment concentration at stations AT1 (a) and BT1 (b)

南北两支潮流在泉州-台中一线交汇,海峡东侧靠近台中处流速最小,普遍小于0.2 m/s,潮流流速最大出现在台湾浅滩-澎湖列岛一线,最大流速可达1.4 m/s;涨憩时,南北潮流的交汇带南移至南澳岛北侧-澎湖列岛南侧一线,流速普遍小于0.2 m/s,潮流流速最大出现在台湾岛西南侧,可达1 m/s;落憩时,潮流分布与涨憩时刻相似,但方向相反,流速最小仍在海峡东侧靠近台中处,普遍小于0.2 m/s,最大出现在台湾浅滩-澎湖列岛一线,最大流速可达1.4 m/s,但海峡北部的流速普遍大于涨憩时的流速;落憩时,海峡内场

表3 各测站模型验证结果统计

Table 3 Statistics of the model validation results at each station

物理量	站点	相关系数(Cor)	平均绝对误差(MAE)	均方根误差(RMSE)	
潮位	East	0.95	0.11	0.14	
	West	0.99	0.08	0.10	
流速	北2	0.75	0.11	0.14	
	南2	0.91	0.07	0.08	
	East	0.91	0.07	0.08	
	West	0.74	0.11	0.03	
流向	北2	0.74	0.63	1.16	
	南2	0.86	0.38	0.81	
	East	0.77	170.81	208.85	
	West	0.75	111.79	141.94	
	有效波高	A	0.91	0.17	0.21
	B	0.82	0.26	0.30	
C	0.43	0.33	0.49		
平均波向	A	0.85	21.35	27.48	
	B	0.73	19.08	27.16	
	C	0.77	28.52	35.32	
谱峰周期	A	0.89	0.71	0.95	
	B	0.74	0.89	1.26	
	C	0.61	1.35	2.04	
悬沙浓度	AT1	0.89	6.63	6.68	
	BT1	0.72	6.09	6.05	

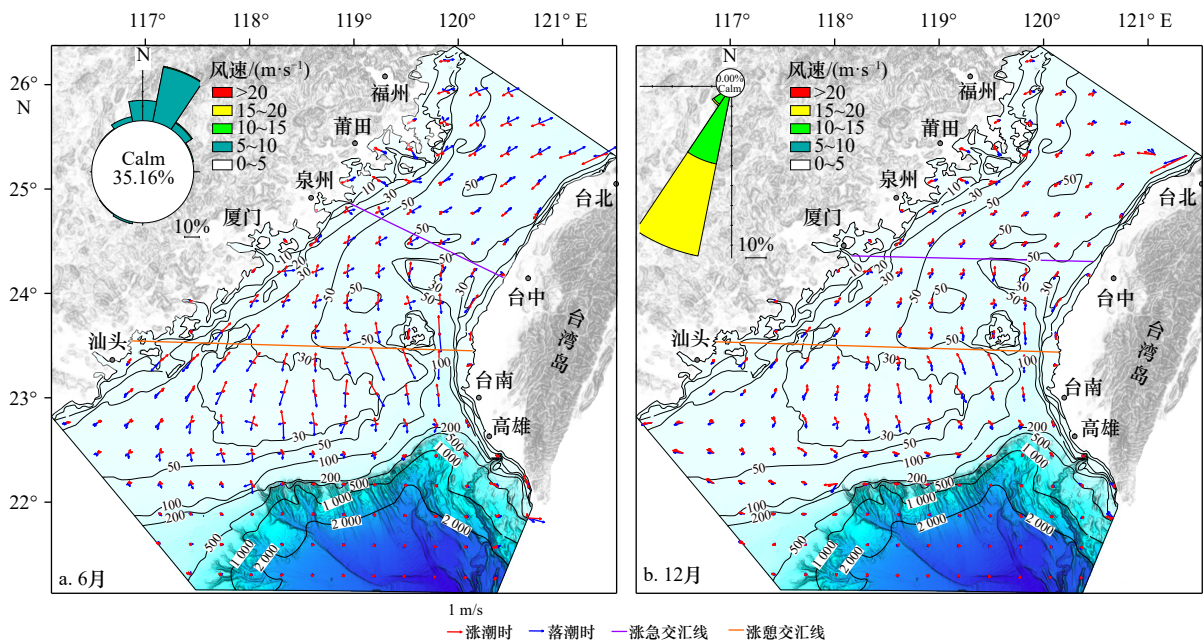


图7 6月(a)和12月(b)台湾海峡涨落潮时刻流场模拟结果

Fig. 7 The simulation results of tidal current fields during the flood and ebb tides in the Taiwan Strait in June (a) and December (b)

分布与涨憩时刻相似,但海峡北部流速普遍大于涨憩时,受岸线形态和季风影响,最大流速出现在海峡西北部的兴化湾,可达 $1\text{ m/s}$ ,台湾浅滩北部至澎湖列岛一带流速较小,普遍小于 $0.2\text{ m/s}$ 。

冬季(图7b),台湾海峡内盛行强劲的东北季风,涨急时,南北两支潮流交汇带在季风的影响下南移至厦门-台中一线,海峡东侧靠近台中处流速最小,普遍小于 $0.2\text{ m/s}$ ,台湾浅滩处流速最大,可达 $0.9\text{ m/s}$ ,与夏季不同,台湾浅滩南侧、西南侧潮流流向不再是北向,而转变为西北偏西向;涨憩时,南北潮流交汇在汕头-台南一线(较夏季存在南移),流速普遍小于 $0.2\text{ m/s}$ ,受岸线形态制约,潮流流速最大出现在厦门湾、兴化湾等海湾,最大可达 $0.6\text{ m/s}$ ;落急时,海峡内大部分潮流方向为南向、西南向,流速最大出现在台湾浅滩东部,达 $1.2\text{ m/s}$ ,流速最小的区域为海峡北部,流速普遍小于 $0.2\text{ m/s}$ ;落憩时,海峡内流向与落急时刻类似,但流速较小,最大流速出现在台湾浅滩处,达 $0.5\text{ m/s}$ ,流速最小的区域为海峡北部,范围较落急时刻有所扩大,流速普遍小于 $0.2\text{ m/s}$ 。

综合来看,台湾海峡潮流场由东海和南海两支独立潮波系统传入,潮流从海峡两端进入海峡,并在海峡中部相汇,海峡中部潮流流速小于海峡南北两侧的潮流,且南侧大于北侧,该结果与前人的冬季观测结果和模拟结果一致<sup>[31,43]</sup>。夏季涨潮时,西南风对海峡南部的潮流有所增强,抑制海峡北部的潮流,台湾浅滩、澎湖水道-台中浅滩等区域因水深迅速变浅导致流速较大,受台湾浅滩、台中浅滩地形阻挡,潮流越

过台中浅滩后流速迅速减小;落潮时,西南风增强海峡北部的潮流,抑制南部的潮流。冬季海峡盛行东北风,对海峡内潮流的作用与夏季正好相反。

### 4.3 余流分析

潮流余流是潮波运动过程中潮流的非线性作用引起的持久性流动,沉积物的输运受余流影响极大,因此研究台湾海峡余流的空间分布特征对了解沉积物的输运模式具有重要意义。与流场一样,本文以6月和12月作为夏季和冬季的代表月,提取台湾海峡潮位数据,采用S\_tide对潮流进行调和,计算研究区的欧拉余流场(图8)。

夏季(图8a),海峡内盛行西南季风,余流较强的区域出现在海峡北部、南海北部陆坡,海峡北部余流为东北向,南海北部陆坡余流为西向,流速最大可达 $0.3\text{ m/s}$ 。然而,台湾浅滩海域余流相对较弱,仅为 $0.01\text{ m/s}$ 左右,且无明显的优势流向。此外,受台中浅滩地形阻挡,澎湖水道北上余流存在明显的转向,绕行台中浅滩;南海北部陆坡西南向的余流推测是黑潮分支引起的海水逆时针流动<sup>[44]</sup>。

冬季(图8b),受强东北季风影响,余流较夏季有明显增强,且流向与夏季相反。台湾浅滩西南侧、南海北部陆坡余流较强,流速可达 $0.3\text{ m/s}$ ,流向为西-西南向;海峡中部余流较弱,流速普遍小于 $0.1\text{ m/s}$ 。

总的来说,台湾海峡余流与季风密切相关,由于冬季季风强于夏季,余流流速也呈冬强夏弱的特征。需要注意的是,在南海北部陆坡,受黑潮分支的影响,该处一直存在较强的西向余流。

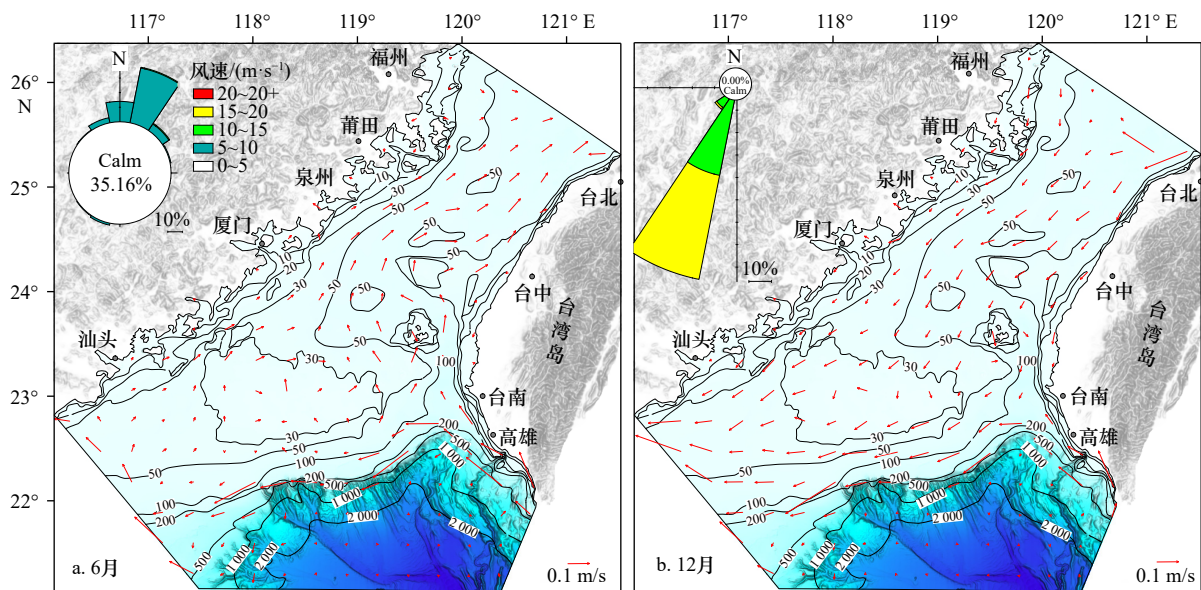


图8 6月(a)和12月(b)台湾海峡余流场模拟结果

Fig. 8 The simulation results of residual current in the Taiwan Strait in June (a) and December (b)

### 4.4 海床演变特征

台湾海峡海洋动力条件复杂,在径流、潮流、波浪等因素共同作用下,海峡内各区域发生不同形态的冲淤。图9、图10分别为台湾海峡夏、冬季代表月和

全年的冲淤变化模拟结果,蓝色(正值)代表淤积,红色(负值)代表冲刷,并且认为变化量在-0.1~0.1 cm的冲淤可忽略不计。

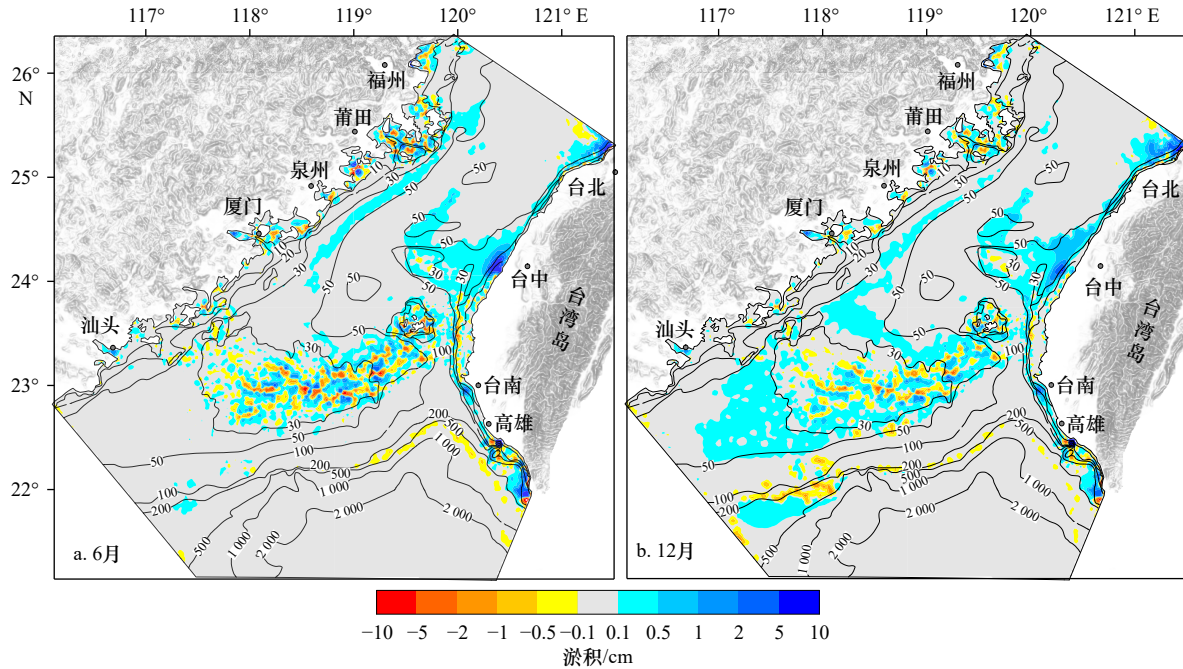


图9 6月(a)和12月(b)台湾海峡冲淤变化模拟结果

Fig. 9 The simulation results of sediment erosion and deposition changes in the Taiwan Strait in June (a) and December (b)

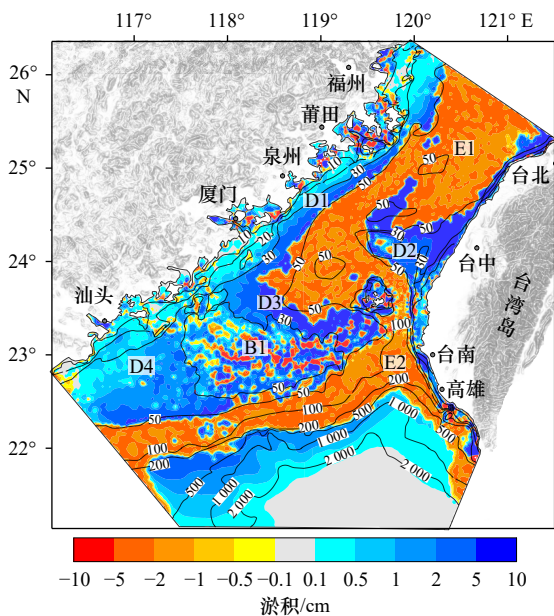


图10 台湾海峡年冲淤变化模拟结果

Fig. 10 The simulation results of annual sediment erosion and deposition changes in the Taiwan Strait

夏季(图9a),台湾海峡冲刷主要发生在西侧近岸海湾、台湾岛西南侧的陆坡区域,冲刷厚度在0.1~0.5 cm。台中浅滩、福建近岸区域以淤积为主,淤积

厚度在0.1~0.5 cm,浊水溪河口区域淤积厚度较大,淤积厚度在5 cm以上。此外,在台湾浅滩-澎湖列岛一带,冲淤变化较为复杂,存在间隔分布的东-西向侵蚀淤积条带,冲淤变化在-1~1 cm。

冬季(图9b),海峡西侧近岸海湾仍存在部分冲刷,南海北部陆坡的冲刷延伸至台湾浅滩南侧,冲刷厚度与夏季相近。与夏季不同,福建近岸的淤积条带从平潭一直延伸至台湾浅滩北部,台湾浅滩西南侧也处于淤积状态;台中浅滩淤积格局与夏季相似。台湾浅滩仍然存在东-西走向的侵蚀淤积条带,但冲淤变化弱于夏季,在-0.5~0.5 cm。

从全年的冲淤结果来看(图10),冲刷主要发生在海峡中部、澎湖水道以及南海北部陆坡上部,年冲刷厚度在2~5 cm。淤积主要发生在海峡西侧近岸、台湾浅滩西南侧、台中浅滩以及南海北部陆坡下部。海峡西侧淤积受等深线制约明显,淤积速率在0.5~5 cm/a;台湾浅滩西南侧淤积速率与海峡西侧相近;台中浅滩北部淤积速率大于南部,最大可达10 cm/a,并且在浅滩西端淤积转为东-北西南向延伸出台中浅滩。在台湾浅滩处,可见东-西向间隔分布的侵蚀淤积条带,冲淤速率在-5~5 cm/a。结合前人利用<sup>210</sup>Pb

法测得的闽浙沿岸沉积速率及福建近岸泥质带的现代沉积速率处于厘米级<sup>[45-47]</sup>,对台湾海峡东侧沉积速率的测定结果也在厘米这一数量级<sup>[48]</sup>,也进一步验证了本文研究结果的可靠性。

## 5 讨论

### 5.1 淤积区机制解释

模拟结果表明,台湾海峡沉积物分布格局有显著的区域特征。根据沉积分布和海底地形,结合海洋动力条件,台湾海峡可划分为4个显著的淤积区(D1:海峡西侧近岸沉积区;D2:台中浅滩沉积区;D3:台湾浅滩北部沉积区;D4:台湾浅滩西南沉积区),两个冲刷区(E1:台湾海峡中部水道冲刷区;E2:南海北部冲刷区),以及1个冲淤平衡区(B1:台湾浅滩)(图10)。为解释上述台湾海峡的冲淤格局,本文也提出了相应的沉积物输运模式(图11)。

#### 5.1.1 淤积区机制解释

D1淤积区呈条带状分布于在福建沿岸(图10)。模拟结果显示该区沉积速率与等深线有较好的相关

性<sup>[21]</sup>,这与海峡西侧近岸的沉积动力密切相关。长江源以及福建沿岸河流的泥沙进入海峡后,在浙闽沿岸流、潮流和波浪的共同作用下,被局限在近岸地区无法输送至海峡中部,淤积下来形成海峡西侧近岸沉积(图11)。夏季,浙闽沿岸流受到西南季风抑制,无法将长江源的沉积物输送到海峡更南部(图9a);冬季,东北季风增强的浙闽沿岸流将长江泥沙输送到台湾浅滩北部(图9b)。此外,前人研究表明,在D1区存在闽浙沿岸锋面<sup>[49]</sup>,锋面靠岸的浅水侧,潮汐混合导致泥沙再悬浮,同时锋面附近迅速升高的盐度可加大絮凝作用,导致泥沙在锋面附近快速沉降(图11a),这可能是D1区淤积速率与离岸距离成正比的原因。目前,D1区沉积物来源充足,潮流流向稳定,预计未来将一直处于微淤积状态。

D2淤积区位于澎湖水道的北部,包括台中浅滩大部分,水深30~50m,平面上呈现出向西逐渐变窄的三角形(图1)。模拟结果表明台中浅滩处于淤积状态,北部淤积大于南部,在台中浅滩西侧靠近海峡中部淤积条带发生显著向北偏转(图10)。D2区沉积

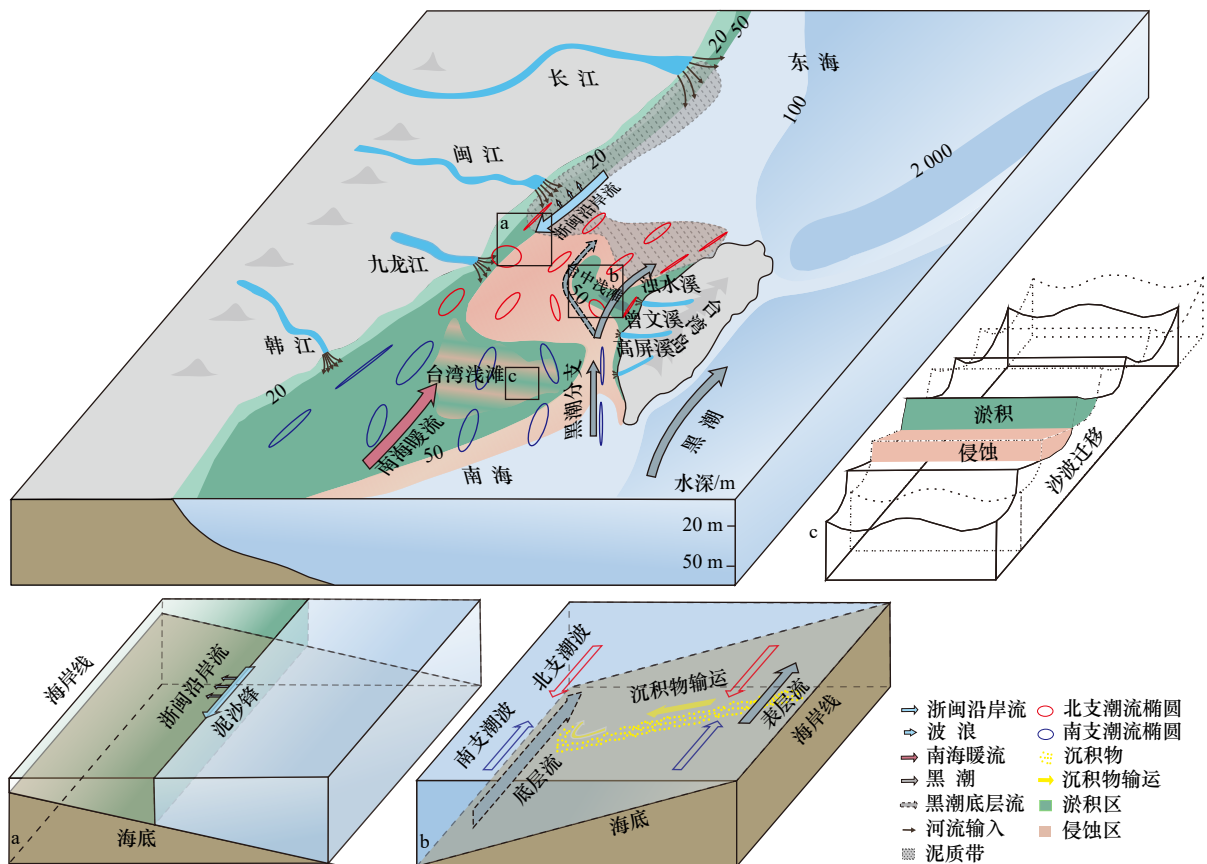


图11 台湾海峡沉积物输运模式

Fig. 11 Sediment transport patterns of the Taiwan Strait

a. D1 淤积区示意图; b. D2 淤积区示意图; c. B1 淤积区示意图

a. schematic diagram of D1 sedimentary area; b. schematic diagram of D2 sedimentary area; c. schematic diagram of B1 sedimentary area

物主要来源于台湾西部山脉的侵蚀,以浊水溪为例,年均输沙高达 66 Mt<sup>[8]</sup>。由于台中浅滩位于东海潮波与南海潮波的交汇处,叠加地形对黑潮分支的阻挡作用<sup>[26]</sup>,台中浅滩的水动力较弱,物源充足、动力不足使得台中浅滩成为海峡东侧沉积堆积中心,沉积物可以一直堆积延伸至海峡中部。海峡中部浅滩末端的沉积物转向东北方向堆积,可能是由于此处失去地形阻挡作用的黑潮分支重新增强,叠加海峡终年向北背景流<sup>[50]</sup>,驱动该区沉积物向北输运(图 11b),此外,北半球的科氏力会使得沉积物流偏向流动方向的右侧<sup>[51]</sup>,这也可能是沉积物转向东北的原因之一。Chang 等<sup>[52]</sup>认为台中浅滩将会在潮流的作用下逐渐分裂成 3 个独立的 NE-SW 向沙体,从本文的模拟结果来看,向东北偏转的沉积体可能具有该演变趋势,但是台中浅滩整体的演化趋势,还需要结合长周期的数值模拟进行探讨。

D3 淤积区是台湾浅滩北部的沉积区,水深 30~50 m。模拟结果表明,该区沉积速率较大(图 10)。推测该区沉积物主要来自包括台湾海峡中部水道冲刷下来的物质以及福建近岸河流输入的沉积物。闽浙沿岸锋面至台湾浅滩北部消失<sup>[49]</sup>,失去约束的近岸沉积物得以向海输运,而 D3 区正好处于南北支潮波的交汇处(图 7),加上台湾浅滩地形的阻挡,使得海峡中部水道冲刷的沉积物和福建近岸河流输入的沉积物在此沉降淤积下来。足够的沉积物供应,又有合适的水动力条件,预计该区未来将一直处于淤积状态并不断向北扩展。

D4 淤积区主要集中在台湾浅滩西南部。模拟结果显示该区整体处于淤积状态,南部淤积较大(图 10)。有研究表明,该区沉积物主要来自福建近岸河流的输入<sup>[22]</sup>,推测沉积物可能受闽粤沿岸锋面及南海暖流的约束<sup>[53,54]</sup>,加上东北部台湾浅滩地形的阻挡,使得沉积物在此沉降堆积。在目前的水动力及物源条件下,推测未来该区会持续呈淤积状态。

### 5.1.2 冲刷区机制解释

E1 冲刷区是海峡中部区域,模拟结果表明,该区整体处于侵蚀状态。从沉积物供应来看,该区只能接受沿岸少量沉积物,海峡西侧的沉积物在浙闽沿岸流及闽浙锋面的约束下,难以到达海峡中部<sup>[55]</sup>,海峡东侧的沉积物大多也淤积在近岸,仅台中浅滩部分沉积物可到达海峡中部<sup>[45]</sup>。物源不足,而海峡中部的潮流动力作用强烈,故而导致 E1 区处于冲刷状态。许志峰等<sup>[55]</sup>通过对台湾海峡中部沉积物的分析,发现海峡中部缺乏现代沉积物,也印证了本文模拟结果的可

靠性。

E2 冲刷区主要包括澎湖水道以及南海北部陆坡,该区北部界线与台湾沿岸锋面和闽粤沿岸锋面的位置恰好吻合<sup>[56]</sup>。与 E1 区类似,该区沉积物供应不足,但受地形变化影响,该处潮流快速增强,在潮落潮流不断冲刷下,最终呈侵蚀状态。

### 5.1.3 冲淤平衡区机制解释

B1 平衡区位于海峡南部出口,平均水深 20 m,该区东南部地形梯度大,水深从 100 m 急剧加深到 2 000 m 以上<sup>[38]</sup>。B1 区沉积物主要是残留沉积,现代河流携带的沉积物被海底地形阻挡,极少能到达此处<sup>[22]</sup>。模拟结果表明该区并不是单纯的淤积或者侵蚀,而是呈现间隔分布的东西向侵蚀-淤积条带(图 10)。潮流模拟结果显示,东海潮波与南海潮波在该区北部交汇(图 7),受季风影响,交汇的位置并不是一成不变,而是随潮波的强弱变化而变动,这可能是 B1 区形成侵蚀-淤积条带的原因之一。

B1 区是著名的台湾浅滩沙波区,该区分布全球罕见的波高超过 10 m 的巨型沙波体系,沙波走向为东西向,与本次模拟的侵蚀-淤积条带基本一致<sup>[38]</sup>。前期基于多期次的多波束测深数据的深入分析发现该区的沙波迁移速率在 1~5 m/a,迁移方向为南北向<sup>[57]</sup>,沙波的大规模迁移也会形成侵蚀-淤积交替分布的沉积格局(图 11c)。本文模拟发现的浅滩侵蚀-淤积交替出现的沉积特征,为阐明 B1 区海底沙波成因机制提供了全新思路。从 B1 区的冲淤变化格局来看,受潮流作用的影响,该区沉积物一直处于运动状态,整体会有往北扩大的趋势(图 10)。

## 5.2 台湾海峡“源-汇”格局

结合本文对台湾海峡冲淤变化的模拟结果(图 9,图 10),本文可得到台湾海峡的源-汇格局示意图(图 12)。

台湾海峡沉积体系的“源”很复杂,海峡西岸主要来源为:长江泥沙在浙闽沿岸流作用下,携带至台湾西部沿岸,沉积物通量为 3 Mt/a;福建沿岸小河流输入泥沙,包括闽江 8 Mt/a,九龙江 3 Mt/a,韩江 7 Mt/a,这些沉积物主要就近堆积;海峡东岸的沉积物源,主要来自台湾本岛的几条河流,如:浊水溪 66 Mt/a,曾文溪 25 Mt/a,高屏溪 70 Mt/a;另一个重要沉积物源是台湾海峡的本地沉积物,在海洋动力作用下的再搬运,但其量级是多少很难估算。台湾海峡的沉积“源”达到 182 Mt/a,已经超过了当前长江 133 Mt/a 和黄河 129 Mt/a 的人海泥沙通量<sup>[36]</sup>。

台湾海峡的“汇”可以分成 D1、D2、D3 和 B1 4 部分进行讨论。



图 12 台湾海峡“源-汇”格局解释示意图

Fig. 12 Diagrammatic interpretation of the “source to sink” structure of the Taiwan Strait

D1区是台湾海峡西侧近岸的泥质沉积带,是长江“源”和福建近岸河流“源”入海沉积物的“汇”,每年大约有20 Mt的沉积物输入并堆积在该区域。入海沉积物受浙闽沿岸流及波浪的作用,沉降淤积在近岸地区。夏季,浙闽沿岸流受西南季风抑制,携带的沉积物无法输送到海峡南部;冬季,浙闽沿岸流在东北季风的增强下,携带的沉积物可输送到台湾浅滩北部沉积下来。冬夏季的余流结果也体现了这一现象。

D2区包括台湾岛西侧近岸及台中浅滩,是台湾河流“源”沉积物的重要“汇”。该区沉积物主要来自台湾岛西侧的山脉,由河流输送入海,每年大约有150 Mt的沉积物输入,该区的沉积通量和已经超过了长江和黄河的入海通量。台湾岛西南侧沉积物入海后,由于澎湖水道的涨落潮流作用较强,且此处有北向的黑潮分支,因此沉积物主要为北向输运,少部分往南进入南海。浊水溪携带的沉积物进入台湾海峡后,由于东海潮波和南海潮波在台中浅滩交汇,导致该区的水动力较弱,加上黑潮分支从台湾岛西南侧带

上来的沉积物,因此,在台中浅滩西部可能存在一个沉积中心。浅滩末端的沉积物转向东北方向堆积,可能是由于此处失去地形阻挡作用的黑潮分支重新增强,叠加海峡终年向北背景流,驱动该区沉积物向北输运。

D3是台湾岛物质向西输入台湾海峡的沉积中心,据周勳佳等<sup>[39]</sup>高分辨率单道地震剖面的研究结果,全新世以来,该区的沉积层厚度达到35~40 m,呈现为自台湾岛向海峡倾斜对接的楔状体,在海底发育了巨型沙波。该部分的沉积动力主要为河流径流、重力流和沿岸流的综合作用。

B1区位于台湾浅滩,既是海峡出口沉积物的“源”,也是该区沉积物再沉积的“汇”。该区的沉积物主要来自当地,现代河流沉积对其供应较少。该区残留沉积在潮流作用的不断改造下,逐渐适应新的海洋动力环境,形成沙波沙脊等地形地貌。周洁琼<sup>[58]</sup>对台湾浅滩多尺度沙波的研究发现,该区巨型的沙波与相对较浅的水深之间并不匹配,推测该区的沉积物还会

在现代海洋动力的作用下不断被改造,直到适应现代的海洋动力环境。此外,在该区施放的海底基原位观测系统观测结果表明,该区沉积物的输运方向主要为南北向,推测未来台湾浅滩会有南北向的扩张趋势。

综上所述,台湾海峡的沉积格局与“源-汇”过程极其复杂,受到多种因素的影响。海峡东西两侧物源充足,都表现为显著的淤积地貌,但受海洋动力、海底地形的作用,呈现出截然不同的演变趋势:在海峡西侧近岸沉积区,长江源和浙闽沿岸河流的泥沙进入海峡后,浙闽沿岸流、潮流和波浪合力导致泥沙局限在近岸区域形成平行于岸线的淤积区,无法输送至海峡中部;与西侧不同,海峡东侧的台中浅滩沉积区,台湾岛的山溪性河流含沙量巨大,受潮波交汇、台中浅滩地形阻挡等因素的影响,海洋动力较弱,故而整体的淤积较大且呈现为向西逐渐变窄的三角形淤积区。海峡中部,由于两侧物源受限,无法输送到此,而海峡中部潮流作用较强,使得该区终年呈现侵蚀状态,水深不断加深。台湾浅滩区域,由于水深较浅,加之南北潮波交汇于此,浅滩上涨、落潮流流速较大,在潮流作用下,台湾浅滩上的沙波处于不断变化中,使得台湾浅滩整体的冲淤分布呈现出侵蚀淤积间隔分布的特征。总体而言,海底地形、季风、潮流、环流等多重因素相互作用,使得台湾海峡沉积格局表现出复杂的特征。此外,季节性的台风和寒潮天气,对于该区的沉积地貌演变的影响也不可小视,但其主要起到侵蚀和改造当地沉积的作用,不是主要动力。

#### 参考文献:

- [1] Rossi V M, Longhitano S G, Olariu C, et al. Straits and seaways: controls, processes and implications in modern and ancient systems[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2023, 523(1): 1-15.
- [2] Rossi V M, Longhitano S G, Olariu C, et al. Straits and seaways: end members within the continuous spectrum of the dynamic connection between basins[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2023, 523(1): 85-109.
- [3] 单新,李顺利,石学法,等.海峡沉积研究进展[J]. *古地理学报*, 2022, 24(6): 1058-1071.  
Shan Xin, Li Shunli, Shi Xuefa, et al. A review of strait sedimentology[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(6): 1058-1071.
- [4] 刘振夏,夏东兴.中国近海潮流沉积沙体[M].北京:海洋出版社,2004.  
Liu Zhenxia, Xia Dongxing. Tidal Sands in the China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004.
- [5] Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Berne S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. *Marine Geology*, 1998, 145(3/4): 225-253.
- [6] 丁文兰.台湾海峡潮汐和潮流的分布特征[J]. *台湾海峡*, 1983, 2(1): 1-8.  
Ding Wenlan. The characteristics of the tides and tidal currents in the Taiwan Strait[J]. *Taiwan Strait*, 1983, 2(1): 1-8.
- [7] 王志豪.台湾海峡的潮汐[J]. *台湾海峡*, 1985, 4(2): 120-128.  
Wang Zhihao. Tides in the Taiwan Strait[J]. *Taiwan Strait*, 1985, 4(2): 120-128.
- [8] Jin Lina, Shan Xin, Shi Xuefa, et al. Hybrid event beds generated by erosional bulking of modern hyperpycnal flows on the Choshui River delta front, Taiwan Strait[J]. *Sedimentology*, 2021, 68(6): 2500-2522.
- [9] 胡毅,陈坚,许江.台湾海峡的海洋沉积环境研究进展[J]. *海洋通报*, 2011, 30(5): 595-600.  
Hu Yi, Chen Jian, Xu Jiang. Progress in the marine sedimentary environment research for the Taiwan Strait[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(5): 595-600.
- [10] 郑文振,陈福年,陈新忠.台湾海峡的潮汐和潮流[J]. *台湾海峡*, 1982, 1(2): 1-4.

## 6 结论

(1)构建了台湾海峡二维水动力与泥沙演变模型,模拟了台湾海峡1年的潮位、潮流和波浪,验证结果显示该模型能够较好地模拟整个海峡的水动力场。台湾海峡潮流场由东海和南海两支独立潮波系统传入,潮流从海峡两端进入海峡,并在海峡中部相汇,海峡中部潮流流速小于南北两侧,且南侧大于北侧,潮流流速夏季大于冬季。

(2)划分了台湾海峡三大类共计7个沉积分区,其中D1~D4为淤积区,E1、E2为冲刷区,B1为冲淤平衡区域。其中,D1区的淤积速率在0.5~5 cm/a,淤积速率与离岸距离成正比;D2区淤积速率在2~5 cm/a,浅滩北部淤积速率大于南部,淤积条带在浅滩西端发生转为东北西南向且延伸出台湾浅滩;D3区淤积速率最大,可达5 cm/a;D4区淤积速率与D1区相似,为0.5~5 cm/a。E1、E2区侵蚀速率相当,为2~5 cm/a。B1区可见东-西向间隔分布的侵蚀淤积条带,冲淤速率在-5~5 cm/a。

(3)建立了台湾海峡沉积输运模式和“源-汇”格局模式,阐述了台湾海峡冲淤格局的动力学机制和“源-汇”过程,认为台湾海峡的沉积格局与水深和地形变化、物源供给和沉积动力有关,合适的沉积动力是台湾海峡冲淤变化的直接原因,物源供给、水深和地形变化等影响台湾海峡冲淤速率和沉积分布。

- ZhengWenzhen, Chen Fumian, Chen Xinzhong. Tides and tidal currents in the Taiwan Strait[J]. Taiwan Strait, 1982, 1(2): 1-4.
- [11] 李立, 王寿景. 对台湾海峡潮流的一点认识[J]. 海洋与湖沼, 1990, 21(6): 578-580.  
Li Li, Wang Shoujing. Notes on the tidal current in the Taiwan Strait[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1990, 21(6): 578-580.
- [12] 吴自银, 阳凡林, 李守军. 高分辨率海底地形地貌——探测处理理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Wu Ziyin, Yang Fanlin, Li Shoujun. High-Resolution Submarine Geomorphology—Theory and Technology for Surveying and Post-processing[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [13] Wu Ziyin, Yang Fanlin, Tang Yong. High-Resolution Seafloor Survey and Applications[M]. Singapore: Springer, 2021.
- [14] 王璐, 熊乐航, 郝彩莲, 等. 疏浚工程对湄洲湾东吴港区水环境影响的数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(3): 17-24.  
Wang Lu, Xiong Lehong, Hao Cailian, et al. Numerical simulation of water environment effects of dredging project in Dongwu Port Area of Meizhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(3): 17-24.
- [15] 黄晨. 兴化湾工程建设对周边海域水沙环境影响[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(16): 330-338.  
Huang Chen. Impacts of Xinghua Bay construction on water and sediment environment in surrounding waters[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(16): 330-338.
- [16] 侯庆志, 左利钦, 陆永军, 等. 强潮流湾水动力环境对人类干预的响应——以泉州湾为例[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(6): 1124-1138.  
Hou Qingzhi, Zuo Liqin, Lu Yongjun, et al. Hydrodynamic environment response to human interventions in a Macro Tidal Bay: the example of the Quanzhou Bay[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(6): 1124-1138.
- [17] 谢森扬, 王金坑, 王翠, 等. 九龙江口-厦门湾悬沙浓度及多岔口潮汐泥沙输运的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2016, 31(2): 188-201.  
Xie Senyang, Wang Jinkeng, Wang Cui, et al. Numerical study on suspended sediment concentration in Jiulong Estuary-Xiamen Bay and sediment transport mechanism in tidal inlets with multi-fork[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, 31(2): 188-201.
- [18] 吴自银. 中国周边海域海底地形与地名图[M]. 北京: 中国地图出版社, 2021.  
Wu Ziyin. Map of Submarine Topography and Undersea Feature Names of China's Surrounding Seas[M]. Beijing: SinoMaps Press, 2021.
- [19] 吴自银. 中国周边海域海底地理实体图集丛书[M]. 北京: 海洋出版社, 2021.  
Wu Ziyin. Map of Submarine Topography and Place Names of China's Surrounding Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2021.
- [20] 吴自银, 阳凡林, 李守军. 高分辨率海底地形地貌——可视计算与科学应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.  
Wu Ziyin, Yang Fanlin, Li Shoujun. HighResolution Submarine Geomorphology—Visul Computation and Scientific Applications[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [21] 吴自银, 温珍河. 中国近海海洋地质[M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
Wu Ziyin, Wen Zhenhe. Marine Geology of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [22] Shen Xiaotian, Jian Xing, Li Chao, et al. Submarine topography-related spatial variability of the southern Taiwan Strait sands (East Asia)[J]. Marine Geology, 2021, 436: 106495.
- [23] 吴自银, 温珍河. 中国海海洋地质系列图[M]. 北京: 科学出版社, 2019.  
Wu Ziyin, Wen Zhenhe. Series of Marine Geological Maps of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [24] 郑祥靖, 李雪丁, 徐啸, 等. 台湾海峡海浪数值模拟和特征分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(5): 31-39.  
Zheng Xiangjing, Li Xueding, Xu Xiao, et al. Numerical simulation and characteristic analysis of ocean waves in the Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 2021, 38(5): 31-39.
- [25] Zhao Shaohua, Qi Hongshuai, Cai Feng, et al. Morphological and sedimentary features of sandy-muddy transitional beaches in estuaries and bays along mesotidal to macrotidalcoasts[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2020, 45(7): 1660-1676.
- [26] Jan Sen, Wang J, Chern C S, et al. Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait[J]. Journal of Marine Systems, 2002, 35(3/4): 249-268.
- [27] Hong Huasheng, Zhang Caiyun, Shang Shaoling, et al. Interannual variability of summer coastal upwelling in the Taiwan Strait[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(2): 479-484.
- [28] Zhou Jieqiong, Wu Ziyin, Zhao Dineng, et al. Giant sand waves on the Taiwan Banks, southern Taiwan Strait: distribution, morphometric relationships, and hydrologic influence factors in a tide-dominated environment[J]. Marine Geology, 2020, 427: 106238.
- [29] BaoJingjing, Cai Feng, Shi Fengyan, et al. Morphodynamic response of sand waves in the Taiwan Shoal to a passing tropical storm[J]. Marine Geology, 2020, 426: 106196.
- [30] 刘金芳, 刘忠, 顾翼炎, 等. 台湾海峡水文要素特征分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(3): 22-32.  
Liu Jinfang, Liu Zhong, Gu Yiyang, et al. Analysis of the hydrographic elements features in Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(3): 22-32.
- [31] 吴岷, 王勇智, 孙永根. 台湾海峡  $M_2$  分潮潮汐潮流特征分布及机制研究[J]. 应用海洋学学报, 2020, 39(4): 460-468.  
Wu Di, Wang Yongzhi, Sun Yonggen. Distribution and mechanism of  $M_2$  tide and tidal current in Taiwan Strait[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(4): 460-468.
- [32] 李传顺, 石学法, 高树基, 等. 台湾河流沉积物的黏土矿物组成特征与物质来源[J]. 科学通报, 2012, 57(2/3): 169-177.  
Li Chuanshun, Shi Xuefa, Kao Shuji, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(6): 673-681.

- [33] Wan Shiming, Li Anchun, Clift P D, et al. Increased contribution of terrigenous supply from Taiwan to the northern South China Sea since 3 Ma[J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1/4): 115–121.
- [34] Yang Shouye, Wang Zhongbo, Dou Yanguang, et al. Chapter 21 A review of sedimentation since the Last Glacial Maximum on the continental shelf of eastern China[J]. *Geological Society, London, Memoirs*, 2014, 41(1): 293–303.
- [35] 陈峰, 王海鹏, 郑志凤, 等. 闽江口水下三角洲的形成与演变——I. 水下三角洲形成的环境因子与地貌发育[J]. *台湾海峡*, 1998, 17(4): 396–401.  
Chen Feng, Wang Haipeng, Zheng Zhifeng, et al. Formation and evolution of underwater delta in Minjiang Estuary—I. Formative environment factors of underwater delta and its geomorphological development[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(4): 396–401.
- [36] Wu Ziyin, Zhao Dineng, Syvitski J P M, et al. Anthropogenic impacts on the decreasing sediment loads of nine major rivers in China, 1954–2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139653.
- [37] 林惠来. 台湾海峡西岸历史年代风沙的初探[J]. *台湾海峡*, 1982, 1(2): 74–82.  
Lin Huilai. A preliminary investigation of historical wind-drift sands along the western coast of the Taiwan Strait[J]. *Taiwan Strait*, 1982, 1(2): 74–82.
- [38] Zhou Jieqiong, Wu Ziyin, Zhao Dineng, et al. Effect of topographic background on sand wave migration on the eastern Taiwan Banks[J]. *Geomorphology*, 2022, 398: 108030.
- [39] 周勤佳, 吴自银, 马胜中, 等. 台湾海峡晚更新世以来的高分辨率地震地层学研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(9): 76–88.  
Zhou Mengjia, Wu Ziyin, Ma Shengzhong, et al. High resolution seismic stratigraphy research in the Taiwan Strait since late Pleistocene[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(9): 76–88.
- [40] Dadson S J, Hovius N, Chen H, et al. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen[J]. *Nature*, 2003, 426(6967): 648–651.
- [41] Water Environments. MIKE 21 & MIKE 3 flow model FM-hydrodynamic and transport module scientific documentation[R]. Water Environments, 2017.
- [42] 李孟国. 海岸河口泥沙数学模型研究进展[J]. *海洋工程*, 2006, 24(1): 139–154.  
Li Mengguo. A review on mathematical models of sediment in coastal and estuarine waters[J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(1): 139–154.
- [43] Shen Junqiang, Qiu Yun, GuoXiaogang, et al. The spatio-temporal variation of wintertime subtidal currents in the western Taiwan Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(11): 4–13.
- [44] 李平原, 路剑飞, 夏真, 等. 南海北部陆坡 30 ka 以来的沉积环境演变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(6): 14–21.  
Li Pingyuan, Lu Jianfei, Xia Zhen, et al. Sedimentary environmental evolution for the past 30 ka of the northern continental slope of the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(6): 14–21.
- [45] Huh C A, Chen Weifang, Hsu F H, et al. Modern (<100 years) sedimentation in the Taiwan Strait: rates and source-to-sink pathways elucidated from radionuclides and particle size distribution[J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31(1): 47–63.
- [46] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19–30.  
Shi Xuefa, Liu Shengfa, Qiao Shuqing, et al. Depositional features and Palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe coastal mud area, East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 19–30.
- [47] 苏贤泽. 福建近岸泥质沉积物泥沙来源区剖析[M]//《台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集》编辑委员会. 台湾海峡及邻近海域海洋科学讨论会论文集. 北京: 海洋出版社, 1995: 170–175.  
Su Xianze. A dissection on silt source of muddy sediments off Fujian coast[M]//《Proceedings of symposium of marine sciences in the Taiwan Strait and its adjacent waters》editorial board. Proceedings of symposium of marine sciences in the Taiwan Strait and its adjacent waters. Beijing: China Ocean Press, 1995: 170–175.
- [48] Lee T, You Chenfeng, Liu T K. Model-dependent  $^{10}\text{Be}$  sedimentation rates for the Taiwan Strait and their tectonic significance[J]. *Geology*, 1993, 21(5): 423–426.
- [49] Ning X, Liu Z, Cai Y, et al. Physicobiological oceanographic remote sensing of the East China Sea: satellite and *in situ* observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C10): 21623–21635.
- [50] Castellort S, Nagel S, Mouthereau F, et al. Sedimentology of early pliocene sandstones in the south-western Taiwan foreland: implications for basin physiography in the early stages of collision[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 40(1): 52–71.
- [51] 冯士筴, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.  
Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. An Introduction to Marine Science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [52] Chang J H, Hsu H H, Su C C, et al. Tectono-sedimentary control on modern sand deposition on the forebulge of the western Taiwan Foreland Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 66: 970–977.
- [53] 李立, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡南部的海洋锋[J]. *台湾海峡*, 2000, 19(2): 147–156.  
Li Li, GuoXiaogang, Wu Risheng. Oceanic fronts in southern Taiwan Strait[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2000, 19(2): 147–156.
- [54] 肖晖, 郭小钢, 吴日升. 台湾海峡水文特征研究概述[J]. *台湾海峡*, 2002, 21(1): 126–138.  
Xiao Hui, Guo Xiaogang, Wu Risheng. Summarization of studies on hydrographic characteristics in Taiwan Strait[J]. *Journal of Oceanography*

- graphy in Taiwan Strait, 2002, 21(1): 126–138.
- [55] 许志峰, 王明亮, 洪阿实, 等. 台湾海峡西部海域晚更新世以来沉积物年代与沉积速率 [J]. 台湾海峡, 1989, 8(2): 114–121.  
Xu Zhifeng, Wang Mingliang, Hong Ashi, et al. Ages of sediments and sedimentation rates of the western Taiwan Strait since late Pleistocene[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1989, 8(2): 114–121.
- [56] 刘东艳, 吕婷, 林磊, 等. 我国近海陆架锋面与生态效应研究回顾 [J]. *海洋科学进展*, 2022, 40(4): 725–741.  
Liu Dongyan, Lü Ting, Lin Lei, et al. Review of fronts and its ecological effects in the shelf sea of China[J]. *Advances in Marine Science*, 2022, 40(4): 725–741.
- [57] Zhou Jieqiong, Wu Ziyin, Jin Xianglong, et al. Observations and analysis of giant sand wave fields on the Taiwan Banks, northern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 132–141.
- [58] 周洁琼. 台湾浅滩多尺度海底沙波特征、迁移规律及动力机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.  
Zhou Jieqiong. Characteristics, migration and dynamic mechanism of multi-scale sand waves in the Taiwan Banks[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

## Numerical simulation of hydrodynamic and sediment transport and analysis of geomorphic erosion and deposition in the Taiwan Strait

Zhong Hao<sup>1</sup>, Zhou Jieqiong<sup>1,2</sup>, Wu Ziyin<sup>1,2,3</sup>, Zhao Dineng<sup>1,2</sup>, Cao Zhenyi<sup>1,4</sup>, Zhu Chao<sup>3</sup>

(1. *The Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*; 2. *Key Laboratory of Submarine Science, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*; 3. *School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China*; 4. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Hangzhou 310012, China*)

**Abstract:** Taiwan Strait is the largest strait in China and the main channel for material and energy exchange between the East China Sea and the South China Sea. The topography changes dramatically and the tidal environment is complex in the Strait. In addition, many mountainous streams on both sides carry a large amount of sediment into the strait. It is an ideal place to study dynamic sedimentation processes. Currently, due to a lack of high-resolution bathymetry and relevant data for the entire Taiwan Strait, there are few studies on modeling the tide and sediment behaviors of the Taiwan Strait as a whole. In this study, based on high-resolution bathymetric and relevant hydrological data, a two-dimensional tidal current numerical model of the Taiwan Strait has been established, and a sediment transport module has been coupled to simulate the sediment transport in the Taiwan Strait. The dynamic simulation results indicate that the tidal current field in the Taiwan Strait is governed by two tidal waves from the south and north, exhibiting distinct temporal and spatial characteristics. The tidal flow velocity is higher in summer than in winter, and it is lower in the central part of the strait compared to the southern and northern sides, with the northern side being less than the southern side. Based on the deposition and erosion simulation results, the Taiwan Strait is categorized into three main types and a total of seven sedimentary subdivisions: deposition zones, erosion zones, and deposition-erosion equilibrium zones. The maximum sedimentation rate in the accumulation zones can reach 5 cm/a, primarily concentrated in the northern part of the Taiwan Bank, with erosion rates ranging from 2 cm/a to 5 cm/a in the erosion zones. Leveraging these simulation outcomes, this study constructs a sediment transport model and a ‘source-to-sink’ pattern model for the Taiwan Strait, elucidating the dynamic mechanisms behind the strait’s deposition and erosion changes and the ‘source-to-sink’ process.

**Key words:** Taiwan Strait; numerical simulation; hydrodynamics; sediment transport; geomorphological evolution