

深圳小漠湾填海工程对潮流水动力及冲淤影响研究

何明珠, 陈斌*

广州大学地理科学与遥感学院, 广东 广州

收稿日期: 2024年3月16日; 录用日期: 2024年5月19日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

基于长序列潮位资料, 使用MIKE21建立大范围二维潮流数学模型, 以深圳小漠湾国际物流港口与华润电厂等大型工程为研究对象, 研究人类活动影响下的小漠湾及附近海域水动力变化特征。研究表明, 围填海工程致使小漠湾海域潮流场有不同程度的变化, 流速方面大多呈现减小状态, 流向方面有一定局部改变, 但总体变化不大。基本上是越靠近工程区, 潮流场变化越为明显。通过数值模型计算工程实施后工程区周边泥沙冲淤强度分布显示, 受工程建设影响, 在潮流作用下工程区附近海域均有不同程度的冲刷和淤积, 最大淤积量在0.08 m, 最大冲刷量在-0.18 m。

关键词

围填海工程, 潮流模型, 岸线变化, 冲淤

Study on the Influence of the Reclamation Project of Xiaomo Bay in Shenzhen on Tidal Water Dynamics and Erosion and Deposition

Mingzhu He, Bin Chen*

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou Guangdong

Received: Mar. 16th, 2024; accepted: May 19th, 2024; published: May 31st, 2024

*通讯作者。

Abstract

Based on the long-series tide level data, a large-scale two-dimensional power flow mathematical model was established using MIKE21, and the hydrodynamic change characteristics of Xiaomowan and the surrounding sea areas under the influence of human activities were studied by taking large-scale projects such as Shenzhen Xiaomowan International Logistics Port and China Resources Power Plant as research objects. The results show that the tidal current field in Xiaomowan area has changed to varying degrees due to reclamation projects, and most of the current velocities have decreased, and the flow direction has changed locally, but the overall change is not large. Basically, the closer you get to the engineering area, the more obvious the change in the tidal force field. By using numerical models to calculate the distribution of sediment erosion and sedimentation intensity around the engineering area after implementation, it was found that due to the influence of engineering construction, the sea area near the engineering area has varying degrees of erosion and sedimentation under the action of tides. The maximum sedimentation amount is 0.08 m, and the maximum erosion amount is -0.18 m.

Keywords

Reclamation Project, Tidal Models, Shoreline Changes, Erosion and Deposition

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人类活动引起的岸线变迁直接导致海域面积的减少和海床地貌的改变, 并进一步影响附近水域和水动力环境[1]。国内外有众多学者针对岸线变迁前后潮流动力变化特征和机制进行了研究[2] [3] [4] [5]。Wisha 等建立水动力模型分析了 1995~2016 年 Benoa 湾岸线变迁对其流场的影响[6]。Chen 等利用 MIKE21 模型建立 2004~2010 年天津近岸海域水动力模型, 指出其纳潮量的减少主要由于围填海开发活动[7]。张功瑾等以珠海人工岛及澳门新城 A 区等大型工程为研究对象探究围填海工程对澳门及附近海域水动力影响[9]。聂超辉等发现莱州湾西南部岸线变迁是海湾潮流、纳潮量和水交换变化的主要原因[8]。张秋丰等从围填海对近海海域地形地貌、水动力环境以及海洋生态环境等方面阐述围填海工程对近海海洋环境影响[10]。彭伟伟等通过数值模拟研究锚地工程建设对海南清澜湾水动力影响, 锚地工程建设后的潮流场、纳潮量和半交换时间变化明显[11]。冯秀丽等运用 ECOMSED (水动力泥沙)三维模型模拟潮流、波浪条件下分析威海靖海湾港区张家埠新港建设对周围海域冲淤影响, 发现淤积区域集中在水动力条件减弱的区域[12]。近年来深汕合作区快速发展, 关于该区域海洋工程对于潮流及泥沙冲淤影响的研究较少。本研究利用 MIKE 21 软件分析工程实施后对周边水域潮流与潮流作用下的泥沙冲淤影响, 本研究可为小漠湾的整治工作提供一定科学指导。

2. 研究区和围填海工程概况

小漠国际物流港, 位于深汕特别合作区小漠镇南部海域。本工程区域属岬湾海岸, 沿岸有多个大小基岩、岬角向海突出, 岬角之间自北向南有圆墩河口湾、小漠沙坝泻湖湾以及澳仔湾。工程海域属不规则日潮混合潮, 泥沙来源少, 泥沙运动的主要方式为波浪掀沙, 潮流输沙。

3. 模型建立

3.1. 中国近海潮波模型

1) 基本方程

采用静压假定, 由于计算范围大, 需考虑科氏加速度随纬度的变化, 需采用球面坐标下的二维潮流基本方程[13]。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{a \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (UD) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (VD \cos \varphi) \right] + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \\ & \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{a \cos \varphi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial U}{\partial \varphi} - \frac{UV}{a} \operatorname{tg} \varphi \\ & = fV - \frac{g}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\zeta - \bar{\zeta}) + \frac{A_H}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial U}{\partial \varphi} \right) \right] - \frac{k_b}{D} \sqrt{U^2 + V^2} U \\ & \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{a \cos \varphi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{a} \frac{\partial V}{\partial \varphi} - \frac{U^2}{a} \operatorname{tg} \varphi \\ & = -fU - \frac{g}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\zeta - \bar{\zeta}) + \frac{A_H}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial^2 V}{\partial \lambda^2} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\cos \varphi \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \right] - \frac{k_b}{D} \sqrt{U^2 + V^2} V \end{aligned} \quad (1)$$

其中 t 是时间; U 、 V 分别为沿水深平均的潮流速在 λ 、 φ 方向上的分量; $D = h + \zeta$ 为总水深, h 为静水深, ζ 为相对于静海面的起伏值; f 为科氏力分量, $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度; g 为重力加速度, A_H 为平均涡粘系数。 k 为运动阻力系数 $k_b = g/C^2$, C 为谢才系数, n 为曼宁系数。 $\bar{\zeta}$ 为因引潮力引起的海面变化值。

2) 计算参数

模型范围 $22^{\circ}27'N$ 至 $22^{\circ}50'N$, $114^{\circ}54'E$ 至 $115^{\circ}33'E$ 。模型区域工程前剖分网格数量为 65,283, 工程后剖分网格数量为 61,793。水平涡粘系数有利于计算稳定, 取为 $1000 \text{ m}^2/\text{s}$ 。底部摩阻, 取曼宁系数 n 为 0.025。

3) 定解条件

定解条件包括初始条件和边界条件。

初始条件, 采用冷启动, 即潮位为零, 流速为零。

边界条件分开边界和闭边界。开边界即水界面, 闭边界为陆界面。

闭边界一般满足流体不可入条件, 即 $\vec{U}_H \cdot \vec{n} = 0$, 其中, $\vec{U}_H = (\vec{U}_\lambda, \vec{U}_\varphi)$ 为水平流速矢量, \vec{n} 为边界法向。

开边界给定潮位过程线, 潮位过程线以下形式给定:

$$\zeta = \sum_{j=1}^8 H_j \cos(\sigma_j t - \theta_j), \text{ 其中 } H_j、\sigma、\theta_j \text{ 分别为各自分潮的振幅、角频率和迟角。}$$

3.2. 潮流泥沙数学模型

1) 基本方程[13]

① 二维深度平均浅水方程

描述水体运动的控制方程有质量方程和动量方程。可以表述为:

连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

X 方向动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial u^2 D}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} - f v D \\ & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\nu_e D \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_e D \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Y 方向动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial v^2 D}{\partial y} + f u D \\ & = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0} + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\nu_e D \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_e D \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, u, v 为水深平均流速在 x, y 方向分量, $u = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u_1 dz$, $v = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} u_2 dz$, u_1, u_2 为三维空间水平面上 x, y 方向流速分量; H 为水深, $H = h + \zeta$; ζ 水位; f 为科氏力系数 $f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球地转角速度, φ 为纬度; ν_e 为有效粘性系数: $\nu_e = \nu_t + \nu$, ν_t 为紊动粘性系数, 可采用 smagorinsky 提出的紊流模型计算[14]; τ_{bx}, τ_{by} 分别为底部切应力在 x, y 方向分量:

$$\tau_{bx} = \rho c_f u \sqrt{u^2 + v^2}; \tau_{by} = \rho c_f v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

c_f 为底部摩擦系数。

τ_{sx}, τ_{sy} 分别为表面风应力在 x, y 方向分量:

$$\tau_{sx} = \rho k_s w_x |w|, \tau_{sy} = \rho k_s w_y |w|, |w| = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (6)$$

本文计算中不考虑风应力的影响, 故 τ_{sx}, τ_{sy} 取零。

② 悬浮物运输扩散模型

悬浮泥沙输移方程为:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} = \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \left(h D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \left(h D_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{F_s}{h} + \phi \quad (7)$$

式中: x, y 为笛卡尔坐标; t 为时间; h 为总水深; S 为悬沙浓度; u, v 为潮流垂线平均流速在 x, y 方向上的分量; D_x, D_y 分别为 x, y 方向上泥沙扩散系数; F_s 为泥沙冲淤函数; ϕ 为源汇项。

③ 海床冲淤变化

根据研究海域悬沙组成特点, 模型由床面临界淤积切应力和临界冲刷切应力确定源汇项。

$$F_s = \begin{cases} \omega S (\tau / \tau_d - 1) & \tau \leq \tau_d \\ 0 & \tau_d < \tau < \tau_e \\ M (\tau / \tau_e - 1) & \tau \geq \tau_e \end{cases} \quad (8)$$

式中 τ_d 为临界淤积切应力(N/m^2), τ_e 为临界冲刷切应力(N/m^2), M 为冲刷系数($kg/m^2 s$)。

由悬浮泥沙引起的床底冲淤变化方程为

$$\gamma_d \frac{\partial \eta_b}{\partial t} - F_s = 0 \quad (9)$$

式中: γ_d 为床沙干容重, η_b 为海床床面的竖向位移(即冲淤变化量)。

2) 定解条件

① 初始条件: $\zeta(x, y)|_{t=0} = \zeta_0(x, y)$; $u(x, y)|_{t=0} = 0$; $v(x, y)|_{t=0} = 0$;

② 动边界: 为避免模型计算出现不稳定性, 潮流模型边界采用干湿法控制的动边界处理。分别设定为 $h_{dry} = 0.005$ m、 $h_{flood} = 0.05$ m 和 $h_{wet} = 0.1$ m, 即当单元水深大于 0.1 m, 动量通量和质量通量都会在计算中被考虑; 当某一单元的水深小于 0.1 m, 不计算动量方程, 仅计算连续方程; 当水深小于 0.005 m 的时候, 不参与计算。

③ 悬沙模型开边界一般要求满足:

入流时: $S(x, y, t)|_{\Gamma} = S_*(x, y, t)$;

出流时: $\frac{\partial}{\partial t}[(h+z)S] + \frac{\partial}{\partial x}[(h+z)uS] + \frac{\partial}{\partial y}[(h+z)vS] = 0$;

闭边界满足 $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$, n 为闭边界外法向方向。

3) 数值求解

① 空间的离散:

地理空间和谱空间的离散采用的是中心单元有限体积法。

② 时间的离散:

时间的离散采用了二阶 Runge-Kutta 方法, 具体形式为

$$U_{n+\frac{1}{2}} = U_n + \frac{1}{2}\Delta t G(U_n) \quad U_{n+1} = U_n + \Delta t G\left(U_{n+\frac{1}{2}}\right) \quad (10)$$

4) 计算参数

① 在模型计算中, 时间步长分为总时间步长和内部计算时间步长, 为满足计算稳定的要求。模型中时间步长取 3 s。

② 紊动涡粘系数

模型中的紊动涡粘系数根据 smagorinsky 公式确定。

$$E = C_s \Delta^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (11)$$

式中: U 、 V 为 x 、 y 方向垂线平均流速, Δ 为网格间距。水平涡粘系数对计算结果影响不大, C_s 系数一般取 $0.25 < C_s < 1.0$ 。

③ 底部糙率系数

底部粗糙系数是数值计算中十分重要的参数。床面阻力系数的确定直接影响到各水力要素的计算结果, 这里需要通过潮位和流速的验证情况来调试率定。模型根据 Manning 公式确定:

$$C = \frac{H^{1/6}}{n} \quad (12)$$

其中, H 为水深, C 为谢才系数, n 为曼宁系数。

3.3. 模型范围及网格剖分

工程海域模型闭边界为自然岸线, 模型东西方向长约 70 km, 南北方向长约 45 km。并对工程区及可能影响到的海域进行了局部加密, 空间步长最小为 10 m, 具体见图 1。

模型验证的资料为 2017 年 10 月工程区海域 1 个潮位站潮位及 4 条同步实测潮流过程数据。具体潮位站及流速流向测点位置见图 2。

潮位验证结果见图 3。由图可知, 潮位的计算值与实测值吻合较好, 与实测值相比, 高低潮位相差不超过 0.10 m, 相位差不超过 0.25 h, 说明本模型的合理性, 基本上反映了工程区附近海域的潮波运动规律, 模拟精度满足工程研究的需要。

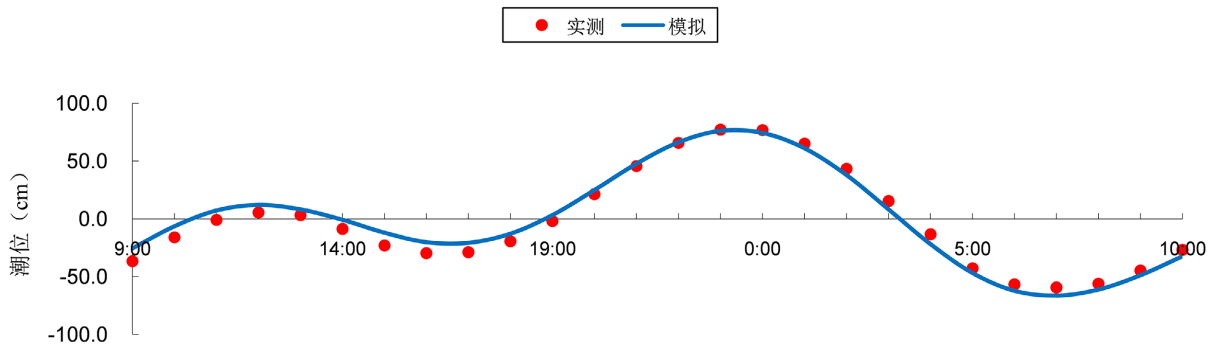
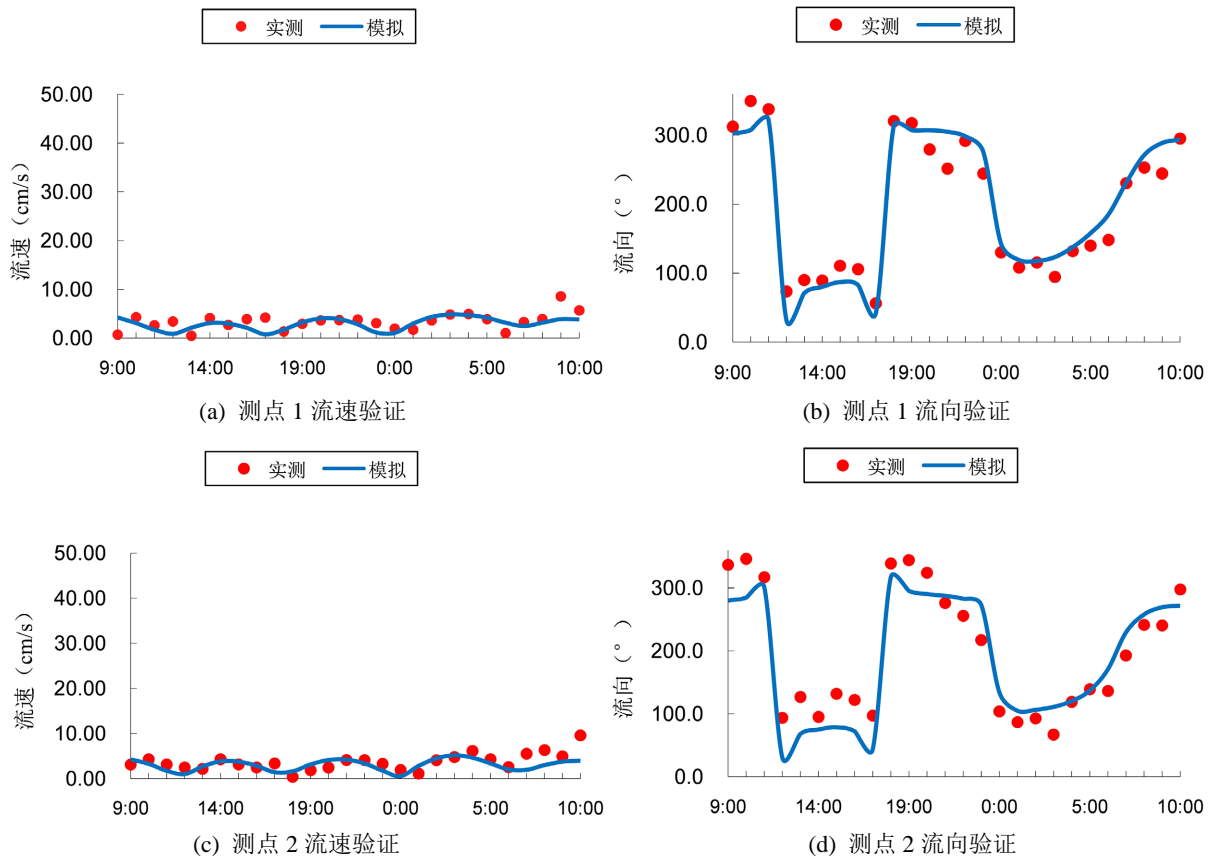


Figure 3. Verification of high tide level
图 3. 大潮潮位验证

流速流向验证结果见图 4, 从图上看各个测点的流速、流向的计算值与实测资料呈现较为明显的往复流的情况基本吻合, 总体上来看, 计算流速、流向数值基本能反映工程附近海域的流场分布情况。



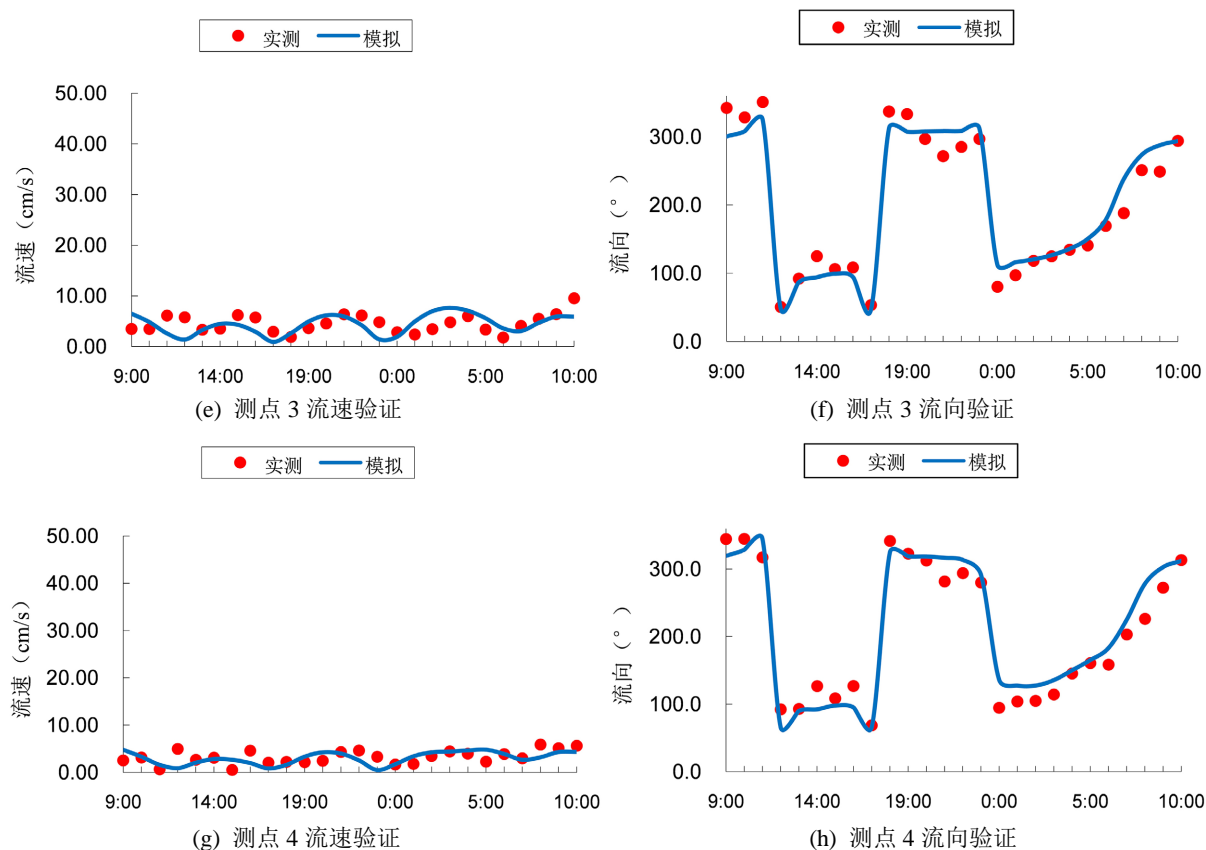


Figure 4. Verification of the flow direction of the large tidal current
图 4. 大潮流速流向验证

为了评估模型模拟结果的可靠性, 需要通过评价标准来对模型进行衡量。本文采用较为常用的统计学方法对模型的模拟结果进行评价, 平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE) [15]、相关系数(r)以及模型技术评分(Skill) [14]进行定量评价。

平均绝对误差

$$MAE = \sum_i^N \frac{|\text{obs} - \text{mod}|}{N} \quad (13)$$

均方根误差

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\text{obs} - \text{mod})^2}{N}} \quad (14)$$

相关系数

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (\text{mod}_i - \overline{\text{mod}})(\text{obs}_i - \overline{\text{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{mod}_i - \overline{\text{mod}})^2 \sum_{i=1}^N (\text{obs}_i - \overline{\text{obs}})^2}} \quad (15)$$

模型技术评分

$$\text{Skill} = 1 - \frac{\sum |\text{mod} - \text{obs}|^2}{\sum (|\text{mod} - \overline{\text{obs}}| + |\text{obs} - \overline{\text{obs}}|)^2} \quad (16)$$

在验证时间段内, 潮位验证的 MAE 为 0.06, RMSE 为 0.07, r 为 0.98, 模型技术评分为 0.99。从分析结果来看, 潮位验证的平均绝对误差和均方根误差较小, 相关性系数和模型技术评分较高, 说明本次模型模拟的潮位结果较好, 与实测结果较为吻合。

流速验证评价方面, 流速验证 MAE (表 1) 分别为 0.01、0.02、0.03、0.03; RMSE 分别为 0.14、0.15、0.18、0.19; r 分别为 0.93、0.91、0.89、0.90; 模型技术评分分别为 0.97、0.96、0.93、0.92。

Table 1. Analysis of errors, r -coefficients, and model techniques at various points of flow velocity

表 1. 流速各点误差、 r 系数及模型技术分析

点位	MAE	RMSE	r	Skill
A1	0.01	0.14	0.93	0.97
A2	0.02	0.15	0.91	0.96
A3	0.03	0.18	0.89	0.93
A4	0.03	0.19	0.90	0.92

流向验证评价方面, 流向验证 MAE (表 2) 分别为 0.19、0.20、0.18、0.21; RMSE 分别为 0.23、0.22、0.24、0.22; r 分别为 0.99、0.98、0.99、0.98; 模型技术评分分别为 0.99、0.98、0.99、0.99。

Table 2. Analysis of errors, r -coefficients, and model techniques at various points in the flow direction

表 2. 流向各点误差、 r 系数及模型技术分析

点位	MAE	RMSE	r	Skill
A1	0.19	0.23	0.99	0.99
A2	0.20	0.22	0.98	0.98
A3	0.18	0.24	0.99	0.99
A4	0.21	0.22	0.98	0.99

4.2. 工程建设对水动力影响分析

本文所建立的工程前后的两个数值模型, 除岸线与水下地形略有差异外, 其余采用的是同样的边界驱动条件、物理参数与时间步长等, 所以两套数值模型可以用于围填海工程对水动力环境的影响分析。

红海湾海域入口大、内腹大, 属于半封闭型海湾, 红海湾内海流受潮汐作用较为明显。该海域工程前后涨落潮流场分布见图 5~8, 涨、落潮期间海水从红海湾口流入或流出, 涨潮时海流从红海湾口汇入湾内, 因为从湾口传递到湾内的过程中不受到岛屿或岸线的阻挡, 海流在湾口到湾内大致由东南向西北流, 在流入的过程中, 受到水深和近岸海岸线的影响, 流速从湾口附近的 0.25 m/s 逐渐减小至 0.10 m/s; 落潮期间, 海流方向与涨潮期间正好相反, 表现为海水从湾顶朝着东南方向流出。工程前、后工程区附近海域流场有一定改变, 在两块填海区域出现受填海影响下的明显流速和流向的改变。但影响仅限于工程区附近海域, 对工程区以外海域基本没有影响。此外, 由于落潮历时大于涨潮历时, 造成落潮平均流速大于涨潮平均流速。

从图中可以看出, 工程附近海域整体流速较小, 最大流速不超过 0.15 m/s。涨潮时, 海水从红海湾外海流入项目区域, 流向呈现西北方向, 落潮时, 海水从工程区域流向外海, 流向呈现东南方向。工程前、后工程区附近海域流场有一定改变, 在两块填海区域出现受填海影响下的明显流速和流向的改变。但影响仅限于工程区附近海域, 对工程区以外海域基本没有影响, 也不会对渔船进出港口产生影响。

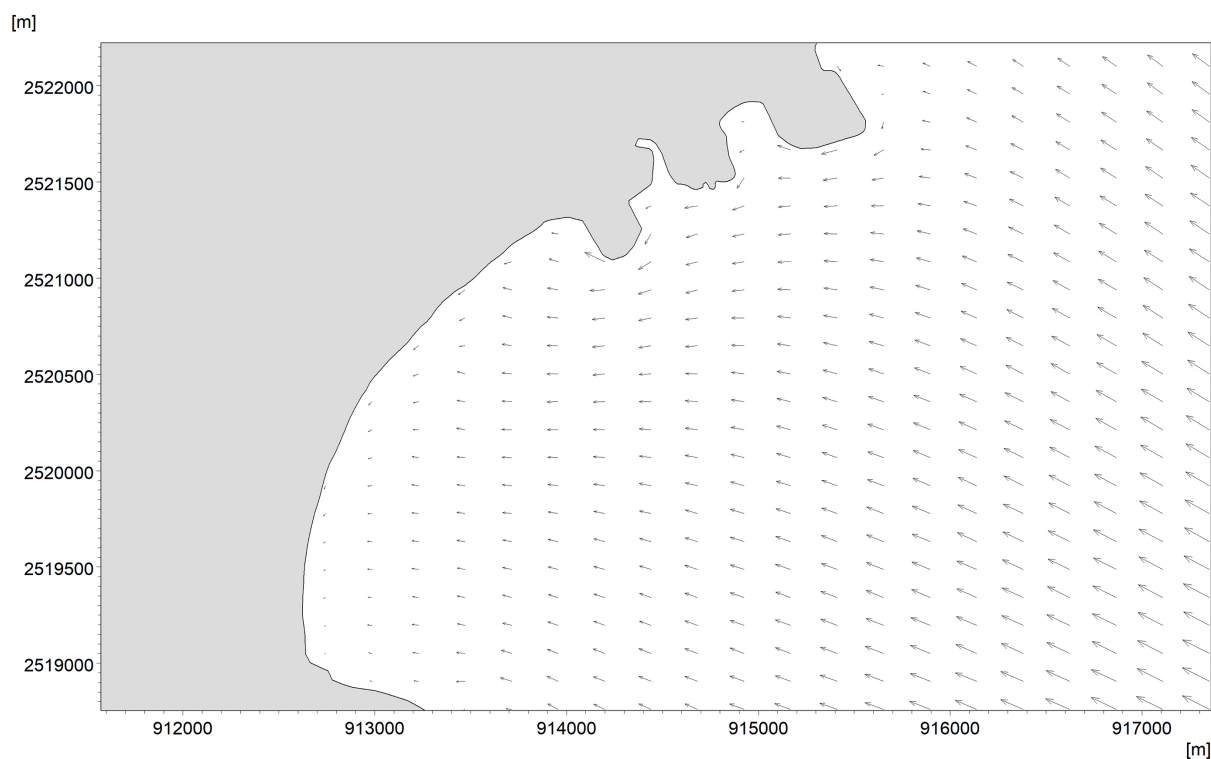


Figure 5. Before the project, the rapid tidal current field in the sea area
图 5. 工程前海域大潮涨急流场



Figure 6. Before the project, the rapid flow field of high tide and low tide in the sea area
图 6. 工程前海域大潮落急流场



Figure 7. After the project, the tidal surge and rapid flow field in the sea area
图 7. 工程后海域大潮涨急流场

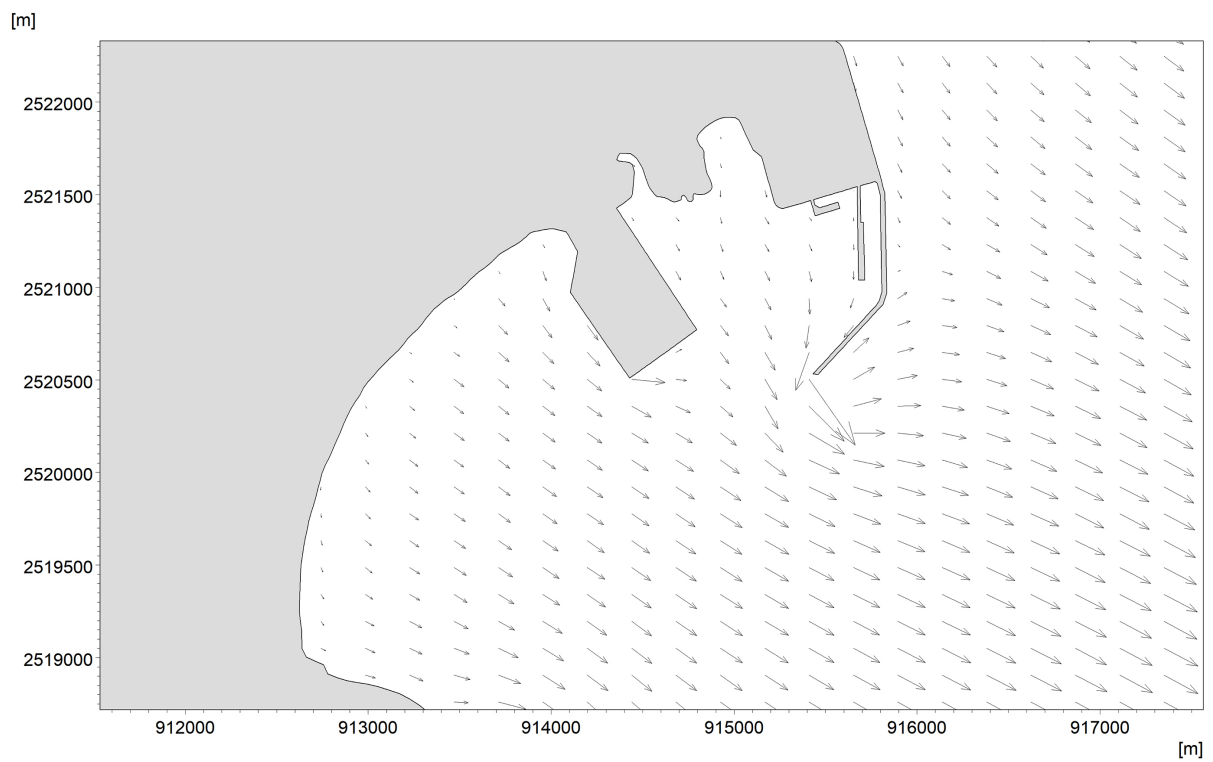


Figure 8. After the project, the rapid flow field of high tide and low tide in the sea area
图 8. 工程后海域大潮落急流场

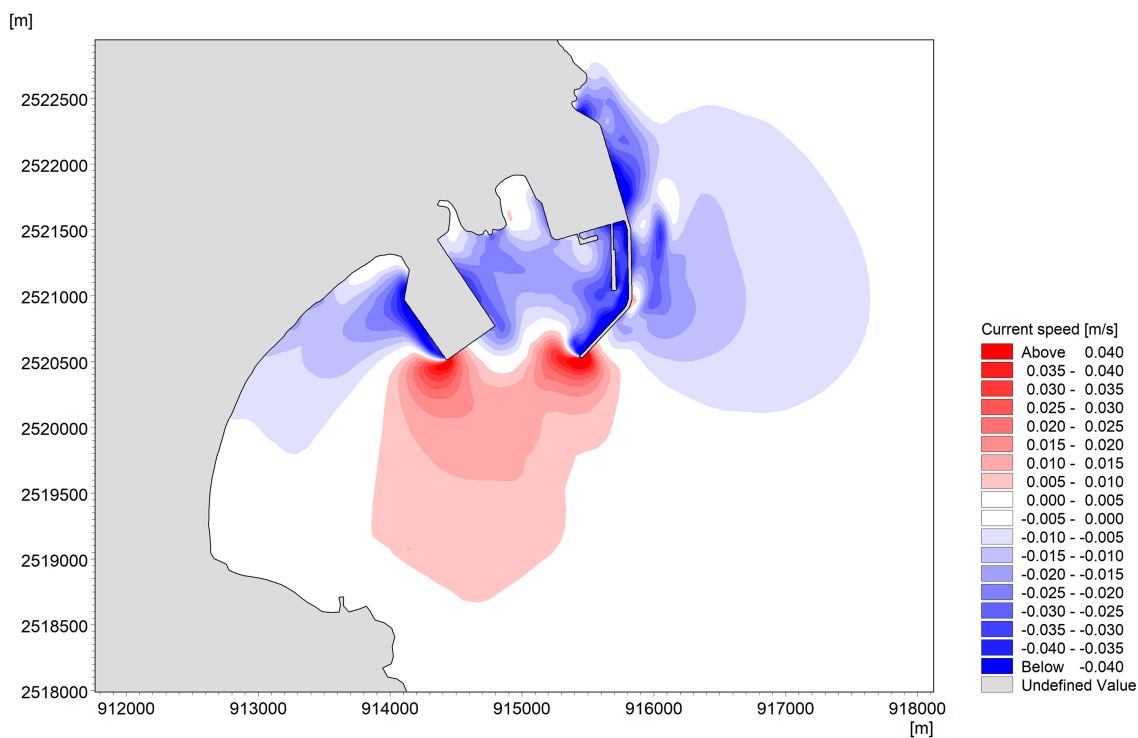


Figure 9. Changes in the rapid flow velocity of the spring tide after the project
图 9. 工程后大潮涨急流速变化

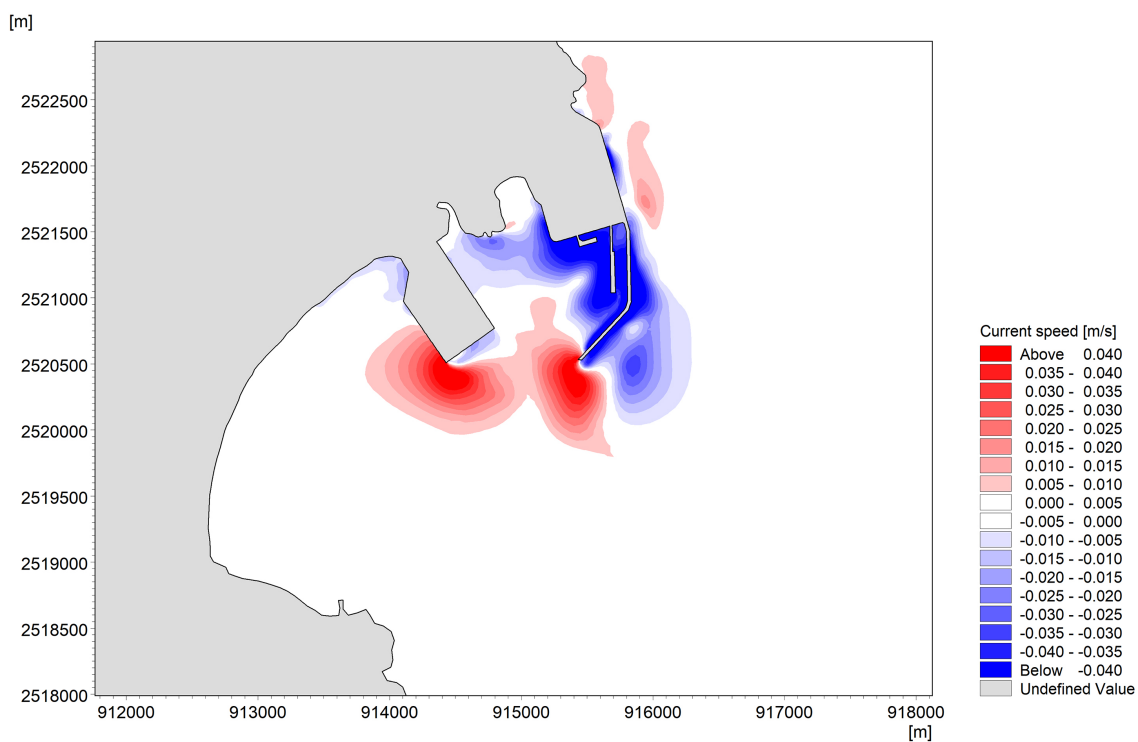


Figure 10. Changes in the rapid flow velocity of spring tides after construction
图 10. 工程后大潮落急流速变化

为直观体现填海区域对潮流运动的影响, 图 9、图 10 给出了工程区域内局部涨急、落急过程流速变化差异。从图中可以看出, 受工程区域的影响, 工程建设涨落急时刻最大改变量为 0.04 m/s, 主要集中在防波堤堤头附近海域, 但改变区域较小, 对于港区外部没有影响。另外, 通过对比工程前后涨急、落急时刻流场分布可以看出潮流流向变化区域主要在工程区域, 远离工程海域流向基本没有变化。

4.3. 工程建设对纯潮流作用下冲淤环境影响预测与评价

工程实施后工程区周边纯潮流作用下的泥沙年冲淤强度分布见图。由图 11 可以看出, 本工程建成后, 受工程区填海的影响, 工程区周边泥沙有冲有淤。淤积主要发生在左侧填海工程顶端、防波堤堤头和右侧填海工程右侧, 冲刷主要发生在右侧填海工程防波堤附近, 其中, 在防波堤堤头附近淤积强度达 0.04~0.04 m/a 左右, 冲刷强度达 0.10~0.18 m/a。分析原因, 挟沙水体由进入工程区后, 水体中携带的泥沙沿程逐渐落淤, 水体中的含沙量随之逐渐减少, 当挟沙水体经过工程区水域, 并进一步向陆地顶部方向输运时, 水体中的含沙量进一步减少, 使得陆地沿岸的泥沙淤积冲刷强度也相对减小。

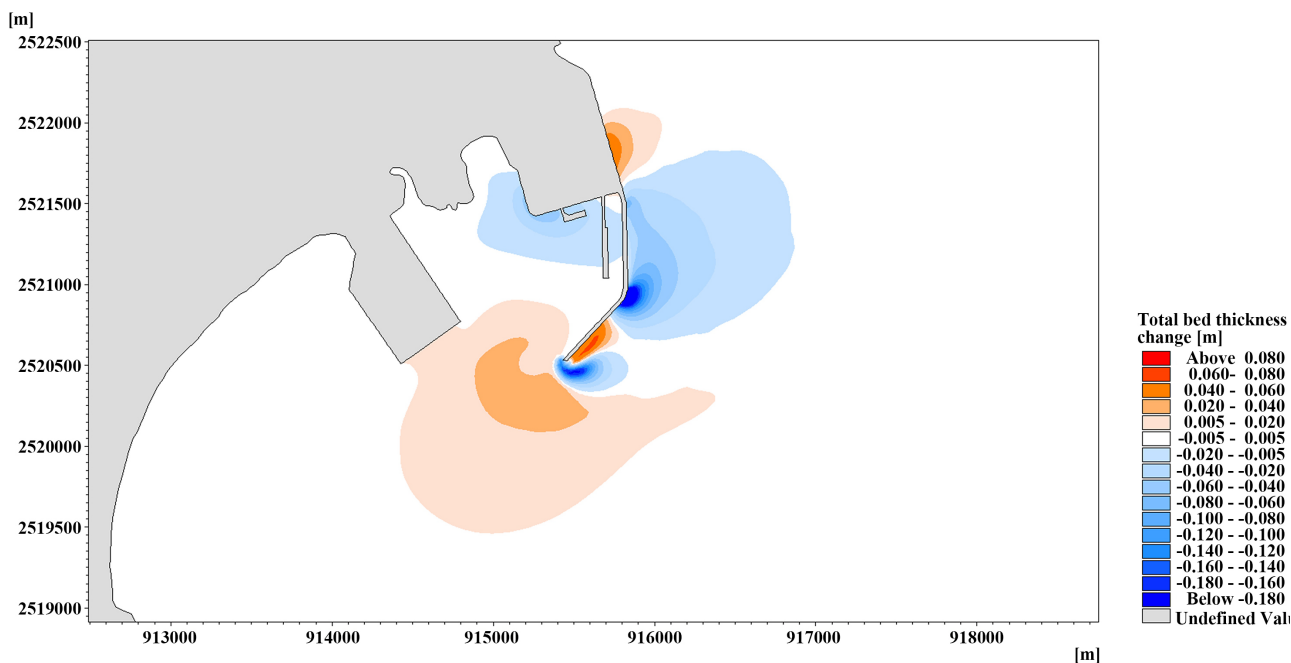


Figure 11. Intensity distribution of sediment erosion and deposition around the project area after project implementation (m/a)

图 11. 工程实施后工程区周边泥沙冲淤强度分布(m/a)

5. 结论

通过数值模拟得到工程对纯潮流作用下的泥沙冲淤影响作用主要变化出现在小漠国际物流港口、华润电厂及其防波堤附近, 主要呈现小范围的淤积与侵蚀; 由于工程规模有限, 因而工程影响的范围也有限, 难以对工程区外的大范围泥沙冲淤产生明显可见的影响。综上, 工程在纯潮流作用下, 仅离工程位置近的区域产生一定的冲刷与淤积作用, 对工程区较远的区域产生的泥沙冲淤影响较小。

参考文献

- [1] 张晓宁. 河口余流场的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [2] 孙永根, 高俊国, 朱晓明. 钦州保税港区填海造地工程对海洋环境的影响[J]. 海洋科学, 2012, 36(12): 84-89.

- [3] 王诺, 颜华崑, 左书华, 等. 大连海上机场人工岛建设对区域水动力及海床冲淤影响分析[J]. 水运工程, 2012(4): 5-11. <https://doi.org/10.16233/j.cnki.issn1002-4972.2012.04.004>
- [4] 王学昌, 孙长青, 孙英兰, 等. 填海造地对胶州湾水动力环境影响的数值研究[J]. 海洋环境科学, 2000(3): 55-59.
- [5] 安永宁. 离岸人工岛群建设对龙口湾冲淤特征的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [6] Wisha, U.J., Tanto, T.A., Pranowo, W.S., *et al.* (2018) Current Movement in Benoa Bay Water, Bali, Indonesia: Pattern of Tidal Current Changes Simulated for the Condition before, during, and after Reclamation. *Regional Studies in Marine Science*, **18**, 177-187. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2017.10.006>
- [7] Chen, H.L.Y. and Yua, H.T. (2015) Study on the Influences of Coastline Changes in Hydrodynamic Force and Tidal Prism of Tianjin Offshore Area. *MATEC Web of Conferences*, **25**, Article No. 04013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20152504013>
- [8] 聂超辉, 吴园园, 朱金龙, 等. 莱州湾西南部岸线变迁对海域水动力影响的数值研究[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(2): 228-236. <https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2023.02.006>
- [9] 张功瑾, 罗小峰, 路川藤, 等. 围填海工程对澳门及附近海域水动力影响研究[J]. 海洋工程, 2022, 40(4): 34-43. <https://doi.org/10.16483/j.issn.1005-9865.2022.04.005>
- [10] 张秋丰, 靳玉丹, 李希彬, 等. 围填海工程对近岸海域海洋环境影响的研究进展[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(4): 454-461.
- [11] 彭伟伟, 娄琦, 徐艳东, 等. 锚地工程建设对海南清澜湾水动力影响数值模拟研究[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(4): 31-39.
- [12] 冯秀丽, 隋倩倩, 林霖, 等. 威海靖海湾港区张家埠新港建设对泥沙冲淤影响预测分析[J]. 海洋科学, 2011, 35(3): 72-76.
- [13] Danish Hydraulic Institute (DHI) (2007) MIKE 21 Flow Model: Hydrodynamic Module User Guide. Danish Hydraulic Institute Water and Environment, 1-89.
- [14] Warner J.C., Rockwell Geyer, W. and Lerczak, J.A. (2005) Numerical Modeling of an Estuary: A Comprehensive Skill Assessment. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, **110**, 1-13. <https://doi.org/10.1029/2004JC002691>
- [15] Zhong, L. and Ming, L. (2006) Tidal Energy Fluxes and Dissipation in the Chesapeake Bay. *Continental Shelf Research*, **26**, 752-770. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.02.006>