

朱文谨, 唐虾, 董啸天, 等. 海州湾中型潮汐海湾岸滩横向输沙闭合水深研究[J]. 海洋学报, 2026, 48(x): 1–13, doi:
Zhu Wenjin, Tang Xia, Dong Xiaotian, et al. Study on Closure Depth of Cross-Shore Sediment Transport in Haizhou Bay, a Mesotidal Embayment[J]. Haiyang Xuebao, 2026, 48(x): 1–13, doi:

海州湾中型潮汐海湾岸滩横向输沙 闭合水深研究

朱文谨¹, 唐虾¹, 董啸天¹, 莫春艳¹, 张洋¹

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005)

摘要: 闭合水深作为泥沙收支平衡和形态动力学研究中的重要参数, 在海岸侵蚀相关工程问题中具有重要的研究价值。传统计算方法多基于波浪主导型海岸, 忽略了潮流作用的影响, 难以准确反映中型潮汐海湾的实际情况。以连云港海域所处的海州湾为研究对象, 结合实地勘测、数值模拟与理论分析, 系统探讨了潮流对闭合水深的的影响机制。数值模拟结果表明, 海州湾潮流作用由北向南逐渐减弱的趋势, 潮流显著增强了近岸区域的泥沙扰动能力, 闭合水深范围为 8–10.1 m, 较纯波浪作用下的结果水深增加 0.4–1.3 m。历史海图水深对比显示海州湾实际闭合水深范围为 8.9–9.8 m, 本文计算结果与实测值高度吻合, 进一步说明了方法的可靠性。新方法强调了中型潮汐海湾中潮流对于底部切应力的增加, 考虑了潮流对闭合水深的的影响, 为相关海岸工程问题提供了科学依据和技术支持。

关键词: 海州湾; 闭合水深; 起动水深; 数值模拟; 潮流影响

中图分类号: **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2026)x-0001-13

1 引言

海岸带位于海陆相互作用的交界处^[1], 多种因素的综合作用下极易引发海岸侵蚀和淤积^[2-5], 海岸侵蚀的本质是泥沙收支的不平衡。闭合水深作为泥沙运动活跃的向海边界, 在海岸工程方面得到较为广泛的应用^[6-7]。

国内外学者对闭合水深的获取方法主要有岸滩剖面实测法、理论计算法和沉积物特征法^[8-10]。岸滩剖面实测法虽相对可靠但成本高昂, Hinton 等^[11]对荷兰一段 31 km 海岸进行了长达 25 年的时空尺度剖面监测; Hallermeier^[12-13]认为存在一个浅水波作用下导致海床强烈扰动的假设边界, 可以用弗劳德数来描述它; 随后 Hallermeier^[14]利用线性波理论量化波浪特征对闭合水深开展研究; 为了更为准确的获取闭合水

深, Aragonés 等^[15]提出了一种根据泥沙中值粒径变化趋势得到闭合水深的方法。国内不少研究者在探讨横向输沙^[16-18]时, 通常也会对闭合水深进行研究, 戴志军等^[17]以 200509 号台风“麦莎”为例, 认为近岸 1 m 区域是台风影响下最敏感的地带, 泥沙在闭合水深范围内发生纵、横向运移; 陈西庆等^[18]认为长江三角洲海岸不是砂质海岸中典型的均衡剖面, 其具有确定的闭合水深, 这为应用 Bruun 法则提供了一定依据与可能。

上述提到关于闭合水深的研究多以波浪为主导, 应用场景仅限于波浪为主导的海岸, 尽管近岸地区波浪产生的底部切应力大于潮流产生的底部切应力, 而在中潮或强潮^[19]环境中, 潮流流速也会对底部切应力产生一定的影响。根据已有潮位观测资料, 海州湾平均潮差为 2–4 m, 属于典型的中型潮汐海湾。本研

收稿日期: 2026-03-08; 修订日期: 2026-04-10。

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20230692); 连云港市科技计划面上项目(JCYJ2433)。

作者简介: 朱文谨(1981—), 男, 江苏江都人, 教授, 主要从事港口海岸及近海工程, E-mail: zhucius@jou.edu.cn

究以海州湾为研究对象,构建水沙动力数学模型且充分考虑潮流因素,确定泥沙临界起动切应力、起动水深,进而确定海州湾闭合水深,分析潮流对海州湾闭合水深的影响。

2 研究区概况

海州湾为典型的弧形海湾,北起山东省日照市岚山辖区佛手咀,南至江苏省连云港市高公岛^[20],濒临黄海,呈大喇叭口型(图 1)。湾口宽 42 km,岸线长

86.81 km,海湾面积 876.39 km²。潮差导致潮流流速发生变化,而潮流流速会对泥沙起动产生影响。Short 等^[21]认为潮差作为分类的主要依据,直接决定海滩的形态和动态特征。潮差范围大于 4 m,为强潮汐海滩;潮差范围 2–4 m,为中型潮汐海滩;潮差范围小于 2 m,为弱潮汐海滩,后续许多研究则沿袭了这一概念^[22–24]。根据连云港市潮位观测资料统计结果^[25]显示(表 1),连云港沿岸潮汐平均潮差在 2–4 m 范围内,属于中型潮汐。

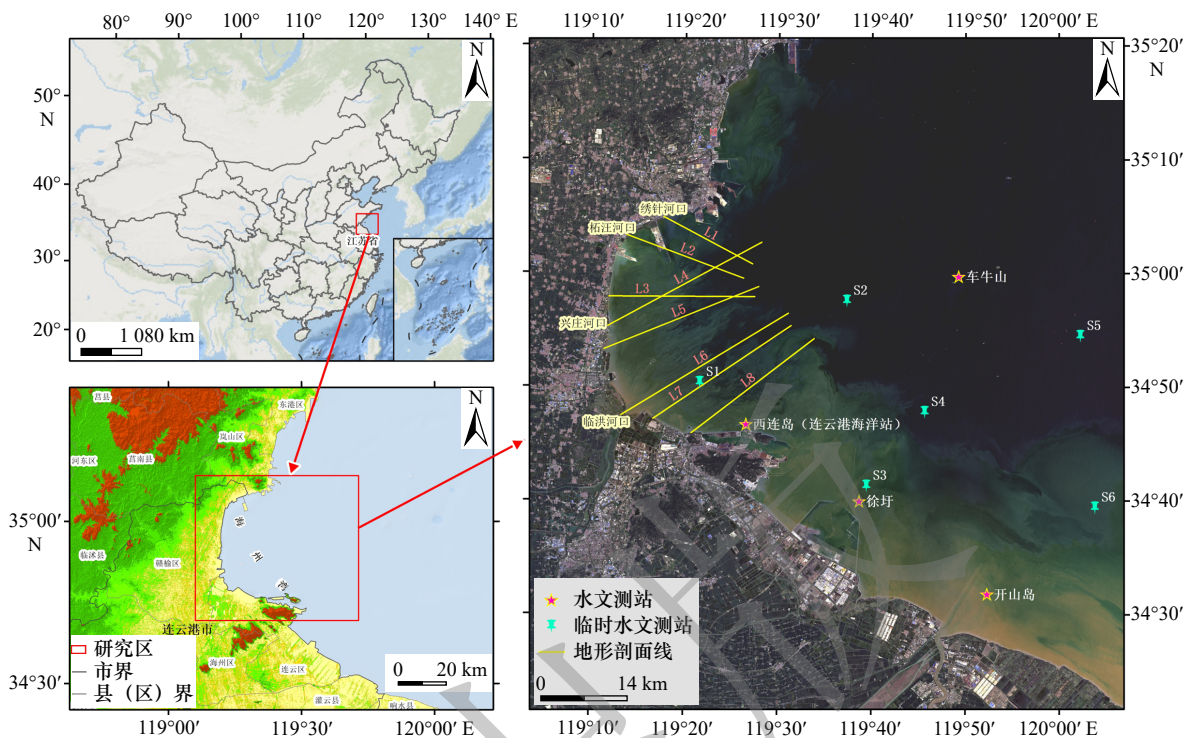


图 1 研究区位置

Fig. 1 location of the study area

表 1 连云港潮位特征值

Table 1 Tide characteristic value of Lianyungang

项目	连云港(85高程基准)
平均海面	6 cm
最高高潮	358 cm
最低低潮	-335 cm
最大潮差	611 cm
平均高潮位	192 cm
平均低潮位	-173 cm
平均潮差	364 cm
平均落潮历时	6 h 52 min
平均涨潮历时	5 h 33 min

3 数据与方法

3.1 数据

本研究采用的数据主要包括气象、地形与沉积物及水水泥沙观测数据。潮汐数据来源于连云港海洋站 1991–2020 年观测资料,波浪数据采用 1962–2003 年实测数据,风场数据取自欧洲中尺度天气预报中心;地形数据选取海州湾 2000 年与 2015 年历史海图资料,用于水深剖面提取及闭合水深判定,沉积物数据为 2016 年 5 月布设取样点所测数据。模型验证依据《港口与航道水文规范》^[26]中波高参考值,并结合 2023 年 4 月水文测站的实测潮位、流速及临时测站获取的悬沙浓度数据。具体信息见表 2。

3.2 闭合水深的判断标准

闭合水深的监测值通过监测岸滩剖面的冲淤变

表 2 数据来源
Table 2 Data sources

数据类型	数据名称	时间	数据来源
气象数据	波浪数据	1962~2003年	连云港海洋站
	风场数据	2019年4月-10月	欧洲中尺度天气预报中心
地形与沉积物采样数据	历史水深地形数据、沉积物采样数据	2000年、2015年、2016年5月	连云港海州湾地区的历史海图资料、采样点资料
水文泥沙数据	波高参考值	10年一遇、5年一遇	《港口与航道水文规范》连云港海洋站
	潮位/流速数据、悬沙浓度数据	2023年4月	水文测站(开山岛、车牛山、西连岛、徐圩)、临时水文测站(S1~S6)

化来确定,在某一深度范围内,岸滩剖面呈显著的冲淤变化,而该深度以下剖面无明显变化,则这一深度可被认为是闭合深度。Nicholls等^[27]认为“剖面无明显变化”这一概念可通过垂向深度变化确定。Nicholls等^[8]经过长达12年、数百次剖面测量,确定6 cm的变化值为判定闭合水深的最佳标准;Valiente等^[28]采用观测剖面形态、沉积物取样等多种方法综合分析英格兰南部海湾的“活跃”近岸边界,确定垂向形态变化14 cm为判定闭合水深的最佳标准;鉴于历史海图数据在测绘、潮位改正及数字化过程中存在系统误差,为降低由此引入的统计噪声影响,本文采用6~14 cm作为判定闭合水深的最佳标准,以确保识别结果反映真实的岸滩形态演变,而非测量或处理过程中的随机不确定性。

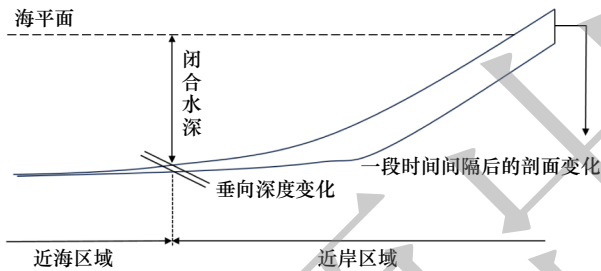


图 2 剖面变化下的闭合水深选取

Fig. 2 Selection of depth of closure under section change

邹志利^[29]指出,当 $\theta > 2\theta_{cr}$ 时,泥沙开始有净位移运动,可将 $\theta > 2\theta_{cr}$ 作为计算闭合水深的判据,即2倍沉积物临界起动切应力对应的水深为闭合水深。Soulsby^[30]将底床沉积物临界起动切应力与无量纲的临界希尔兹数 θ_{cr} 相联系,沉积物起动所需的临界切应力:

$$\tau_{cr} = \theta_{cr} g (\rho_s - \rho) D_{50} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为沉积物密度; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; D_{50} 沉积物的中值粒径。Madsen等^[31]将希尔兹曲线转换为临界希尔兹数 θ_{cr} 和 $S_* = D_{50} \sqrt{(s-1)gD_{50}/4\nu}$ 的关系($s = \rho_s/\rho$, ν 是流体运动粘度)。

3.3 数值模型建立与验证

3.3.1 波浪模型

第三代海浪模式SWAN的控制方程为动谱平衡方程^[32],采用二维作用量谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 来描述随机波浪场,作用量密度与能量密度两者之间的关系可表示为: $N(\sigma, \theta) = N(\sigma, \theta)/\sigma$ 。其中 σ 为相对频率, θ 为波向:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial \lambda} C_\lambda N + \cos^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi} C_\varphi \cos \varphi N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (3)$$

上式左边第一项为 $N(\sigma, \theta)$ 随时间的变化率;第二和第三项表示 $N(\sigma, \theta)$ 在空间 x, y 方向上的传播;第四项表示流场和水深所引起的 $N(\sigma, \theta)$ 在 σ 空间的变化,即波动相对频率的频移;第五项表示 $N(\sigma, \theta)$ 在 θ 空间的传播,即水深和流场引起的波浪折射。方程式右边 S_{tot} 表示描述物理过程的源、汇项之和, $C_x, C_y, C_\sigma, C_\theta$ 分别代表动谱密度在 x, y, σ, θ 空间的传播速度。

3.3.2 潮流模型

二维潮流连续方程和动量方程^[33]:

(1) 连续方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_0}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \alpha_0}{\partial y} \right) - fu - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (6)$$

式中, x, y 为水平坐标轴; u 和 v 为 x, y 轴向流速; t 为时间变量; g 为重力加速度; h 为水深; α_0 为滩面高程; ρ 为水流密度; f 为柯氏力参数($f = 2\omega \sin \phi$, ω 是地球自转的角速度, ϕ 为纬度); $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yx}, \varepsilon_{yy}$ 紊动粘滞系数; c 为谢才系数。

3.3.3 泥沙输运模型

泥沙输运扩散方程^[34]如下:

$$\frac{\partial h s_0}{\partial t} + \frac{\partial h u s_0}{\partial x} + \frac{\partial h v s_0}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon h \frac{\partial s_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon h \frac{\partial s_0}{\partial y} \right) + F_s \quad (7)$$

式中, u 、 v 分别为 x 、 y 方向上的垂向平均速度; s_0 为垂向平均含沙量; h 为水深; ε 表示垂向平均的扩散系数; F_s 为近底泥沙通量。

3.3.4 模型验证

网格划分

模拟计算区域为 $119.190\ 8^{\circ} \sim 121.329\ 0^{\circ}E, 33.639\ 2^{\circ} \sim 36.212\ 6^{\circ}N$, 采用无结构三角形网格, 共形成 47 837 个单元格, 由 25 291 个节点组成, 最小网格分辨率为 5 m, 见图 3。

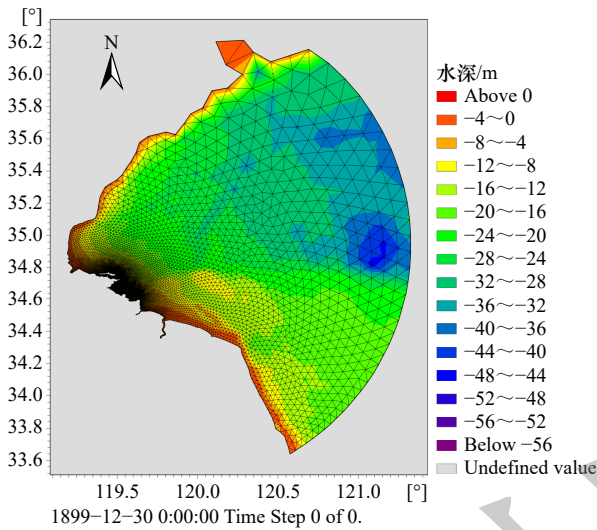


图 3 研究区域水深

Fig. 3 The water depth of study area

模型的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, 其中波浪模型的开边界条件根据实测资料综合给出, 泥沙模型的开边界由公式给出:

$$\begin{cases} S(x, y, t)|_r = C_s(x, y, t) & (\text{当入流时}) \\ \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} = 0 & (\text{当出流时}) \end{cases} \quad (8)$$

潮流模型采用潮汐调和预报潮位过程作为外海开边界条件, 同时采用“干湿判别法”来确定动边界。波浪数学模型中采用的风场数据的背景风场的时间分辨率为 1 h, 空间分辨率 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$; 潮流模型中 n 取值: $0.02 \sim 0.03$; 连云港海州湾位于 $35^{\circ}N$ 附近, 因此其柯氏参量 $f = 2\omega \sin\phi \approx 8.3 \times 10^{-5}$ 。

波浪模型验证

为确保模型模拟结果的准确性, 分别对模型的波浪、潮流以及悬沙浓度进行验证。表 3、表 4 中连云

港站 10 年一遇、5 年一遇有效波高参考值^[26]与计算值对比, 各方向计算误差均控制在 5.0% 以内, 计算结果与测验值对比吻合, 模型参数可做波高计算及分析。

表 3 连云港海洋站 10 年一遇有效波高参考值和计算值对比

Table 3 Comparison of reference value and calculated value of effective wave height of 10-year return period in Lianyungang Ocean Station

方向	N	NE	E
参考值/m	2.97	3.13	2.25
计算值/m	2.83	3.10	2.27
相对误差/%	-4.8	-1.0	0.8

表 4 连云港海洋站 5 年一遇有效波高参考值和计算值对比

Table 4 Comparison of reference value and calculated value of effective wave height of 5-year return period in Lianyungang Ocean Station

方向	N	NE	E
参考值/m	2.65	2.81	2.00
计算值/m	2.62	2.76	1.98
相对误差/%	-1.1	-1.8	1

率定波浪模型底摩擦、绕射等相关因子, 对连云港海域 10 年一遇和 5 年一遇有效波高进行计算。据实测波浪资料统计, 连云港常浪向为 NE 向, 强浪向也为 NE 向, 研究海域有效波高分布图如下(图 4、图 5)。8 条断面 10 年一遇有效波高范围在 3.6~3.8 m, 5 年一遇有效波高范围在 3.2~3.4 m。Hands^[37]采用 9 年的

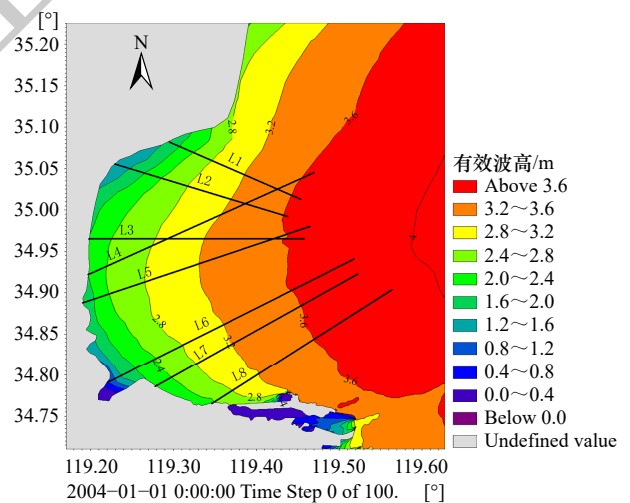


图 4 连云港海域 10 年一遇有效波高分布

Fig. 4 The distribution of 10-year significant wave height in Lianyungang sea area

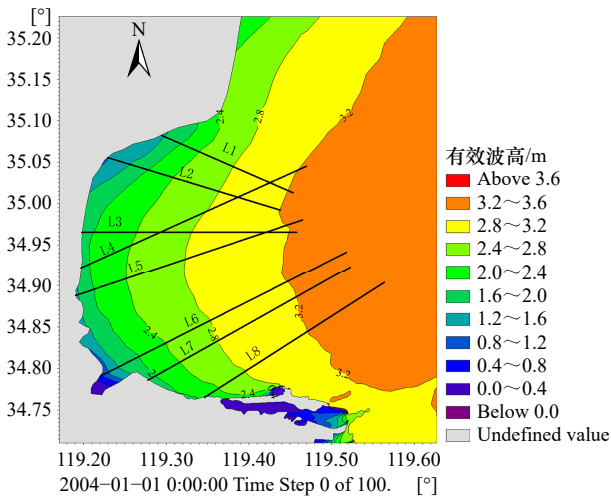


图 5 连云港海域 5 年一遇有效波高分布
Fig. 5 The distribution of 5-year significant wave height in Lianyungang sea area

现场地形资料得到对应的闭合水深为 5 年一遇波浪的波高的 2 倍, 本研究采用 5 年一遇有效波浪数据

潮流模型验证

水文测站布置见图 1, 选取车牛山、开山岛潮位站及 S1、S2、S6 临时潮流测站进行模型验证(图 6、图 7)。结果显示潮位和水流相位基本吻合, 潮流率

定平均误差 4.6%; 流速率定平均误差 4.4cm/s, 各站位涨潮时段平均流速的平均误差 4.9%, 各站位落潮时段平均流速的平均误差 9.5%, 说明潮流模型能较好地模拟该海域的潮流运动。

从计算结果来看, 连云港海域属于典型的规则半日潮区, 潮流以往复流为主, 并受黄海旋转波影响控制呈现逆时针旋转特征。涨、落潮分别在高潮前和低潮前约 1h 发生, 且涨潮历时较长、流速较大, 表现出明显不对称性。大潮期间(图 8-图 9), 海域近岸区域潮流流速较小, 约 0.15m/s, 而向外海区域流速逐渐增加, 可达到 0.35-0.4m/s。进入小潮期间(图 10-图 11), 近岸区域流速较小, 约为 0.1m/s, 且流速减小的影响逐渐向外海扩展, 离岸区域的流速降至 0.25m/s。

泥沙模型验证

将 S1、S2、S6 测点含沙量与实测资料对比(图 12), 模型计算的含沙量与实测值曲线基本一致, 涨落潮平均含沙量计算误差均小于 15%, 含沙量模拟值与实测值大体一致, 能较好地反映海州湾周边海域悬沙浓度状况, 构建的泥沙输运模型能反映海域内泥沙输运特征。从计算结果来看(图 13、图 14), 由于 S1 测点更靠近湾内海岸, 波浪和潮流运动剧烈, 底部剪切应力

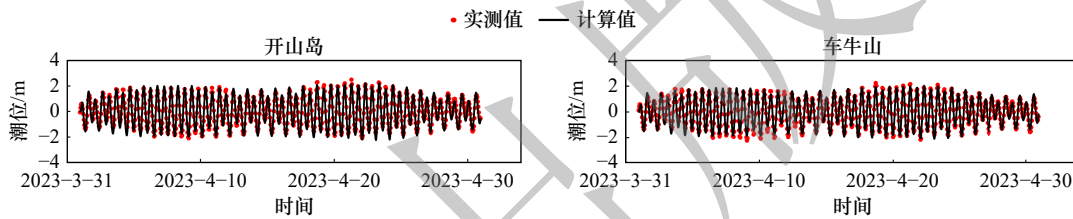
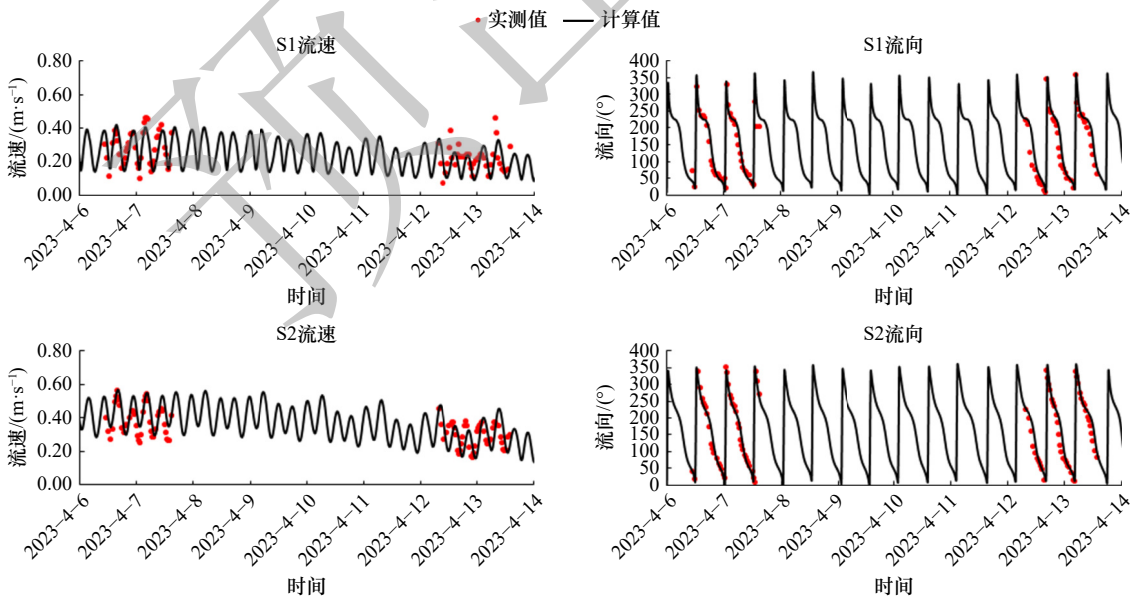


图 6 水文测站潮位验证
Fig. 6 The tide verification of hydrological station



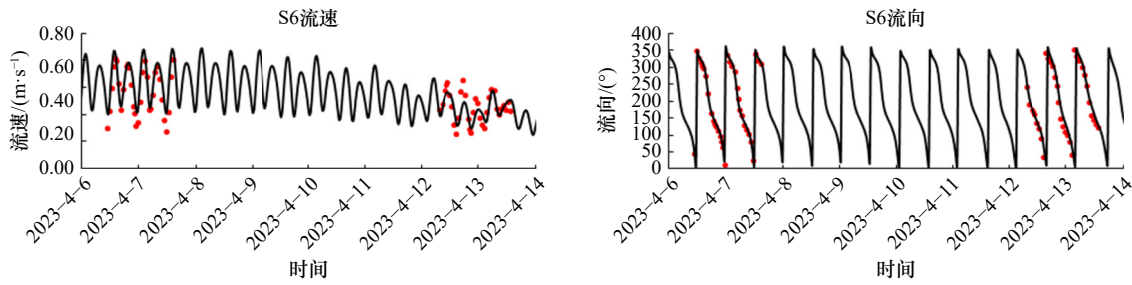


图 7 S1、S2、S6 测点流速、流向验证

Fig. 7 verification of flow velocity and direction at stations S1,S2,S6

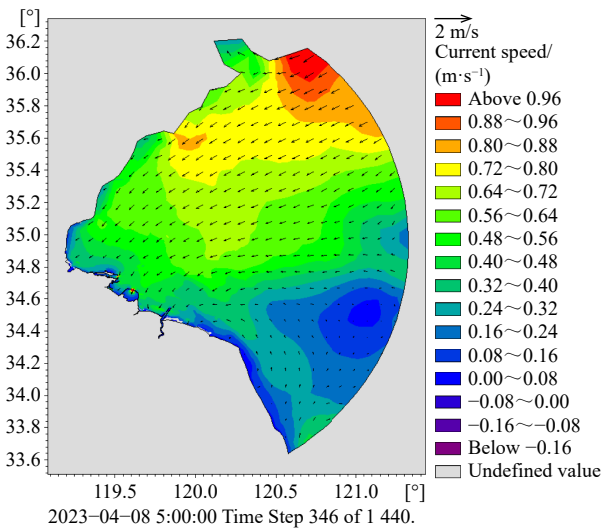


图 8 大潮涨急流场示意图

Fig. 8 The diagram of spring tide flood current field

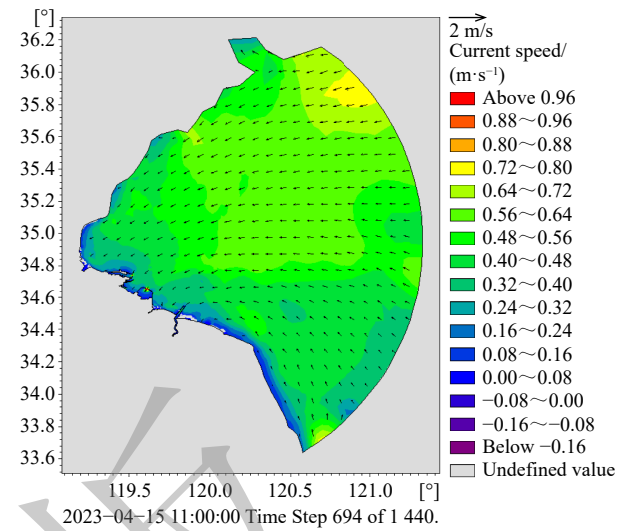


图 10 小潮涨急流场示意图

Fig. 10 The diagram of neap tide flood current field

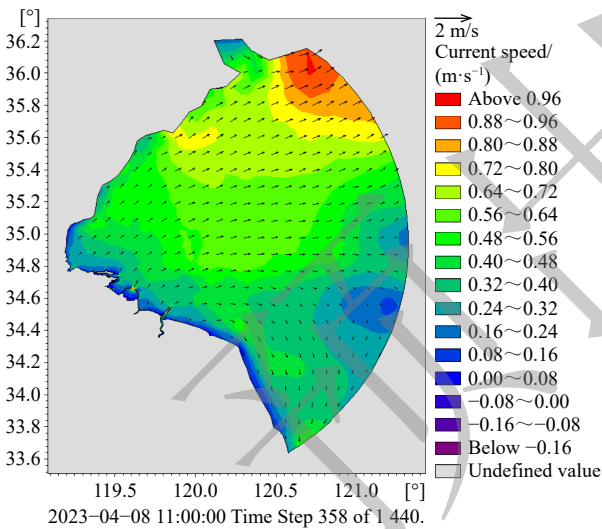


图 9 大潮落急流场示意图

Fig. 9 The diagram of spring tide ebb current field

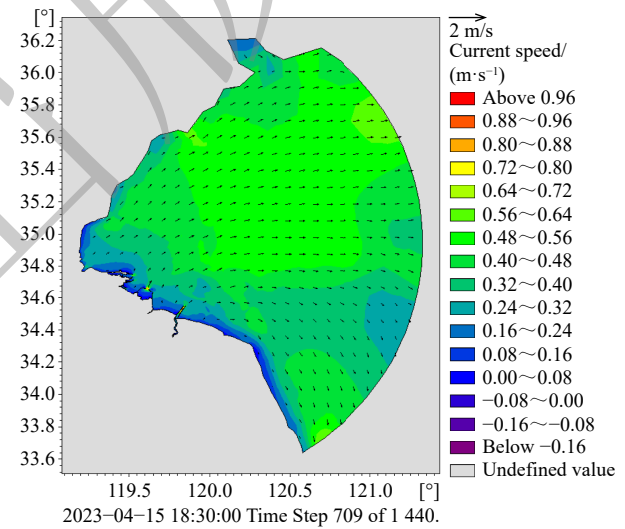


图 11 小潮落急流场示意图

Fig. 11 The diagram of neap tide ebb current field

较大, 泥沙运动频繁, 泥沙浓度较大, 泥沙最大浓度接近 0.05kg/m^3 ; 而 S2 测点靠近外海, 波浪和潮流作用产生的底部剪切应力较小, 泥沙含量较低, 泥沙浓度小于 0.01kg/m^3 。大潮期间, 潮流的涨急落急时刻流速变化显著, 对泥沙运动影响较大, S1 和 S2 测点处的

泥沙浓度是小潮期间的 2 倍。含沙量模拟值与实测值大体一致, 能够较好地反映海州湾周边海域悬沙浓度状况。

3.4 床面剪切应力

床面剪切应力是指水流与河床、海底等底部表面

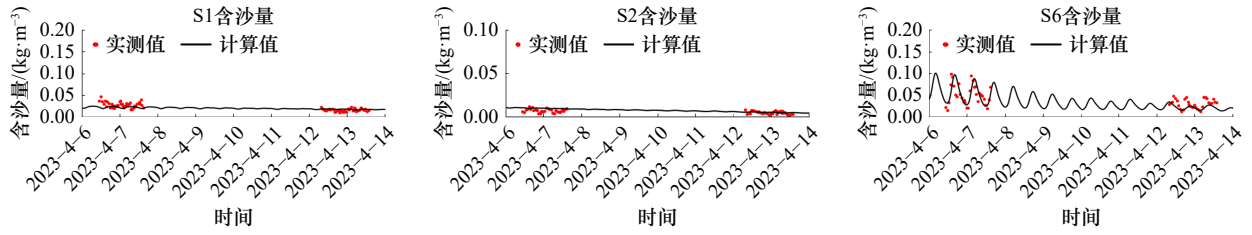


图 12 S1、S2、S6 测点含沙量验证

Fig. 12 verification of sediment concentration at stations S1,S2,S6

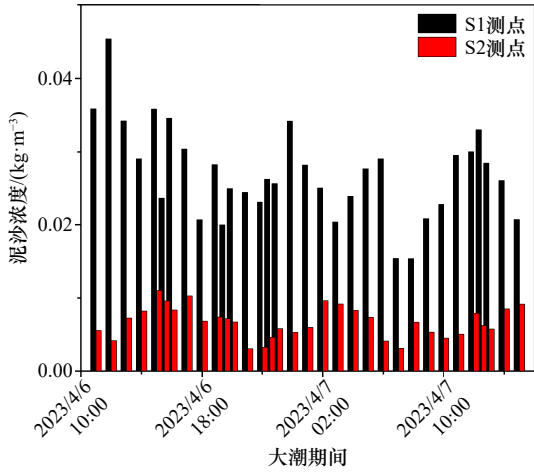


图 13 大潮期间 S1 和 S2 测点的泥沙浓度对比

Fig. 13 Comparison of sediment concentration at S1 and S2 measuring points during spring tide

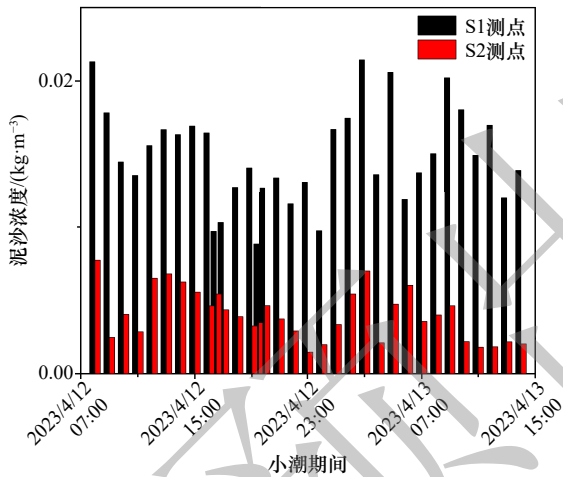


图 14 小潮期间 S1 和 S2 测点的泥沙浓度对比

Fig. 14 Comparison of sediment concentration at S1 and S2 measuring points during neap tide

之间产生的摩擦力,对于泥沙起动、输运以及河床冲刷和淤积等过程有着直接的影响。考虑到波流之间的夹角,本文采用 Soulsby 等^[35]提出的计算方法,提供两种选项:平均剪应力 τ_{mean} 和最大剪应力 τ_{max} :

$$\frac{\tau_{mean}}{\tau_c + \tau_w} = \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \left(1 + b \left(\frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^p \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^q \right) \quad (9)$$

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_c + \tau_w} = 1 + a \left(\left(\frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^m \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_c + \tau_w} \right)^n \right) \quad (10)$$

式中, τ_c 为水流剪切应力; τ_w 为波流剪切应力; b 、 p 、 q 、 a 、 m 、 n 为相关常数,由 Fredsøe^[36]的 c 参数模型给出:

$$b = b_1 + b_2 |\cos \gamma|^i + (b_3 + b_4 |\cos \gamma|^j) \log_{10}(r) \quad (11)$$

$$p = p_1 + p_2 |\cos \gamma|^i + (p_3 + p_4 |\cos \gamma|^j) \log_{10}(r) \quad (12)$$

$$q = q_1 + q_2 |\cos \gamma|^i + (q_3 + q_4 |\cos \gamma|^j) \log_{10}(r) \quad (13)$$

$$a = a_1 + a_2 |\cos \gamma|^i + (a_3 + a_4 |\cos \gamma|^j) \log_{10}(r) \quad (14)$$

$$m = m_1 + m_2 |\cos \gamma|^i + (m_3 + m_4 |\cos \gamma|^j) \log_{10}(r) \quad (15)$$

$$n = n_1 + n_2 |\cos \gamma|^i + (n_3 + n_4 |\cos \gamma|^j) \log_{10}(r) \quad (16)$$

式中, γ 为波流夹角; $i = 0.8$, $j = 3.0$; $r = 2f_w/f_c$, f_w 为波浪摩擦系数, f_c 为潮流摩擦系数。

4 讨论

4.1 波流作用下的床面剪切应力分布特征

床面剪切应力是控制近岸泥沙起动与输运过程的重要参数,其空间分布特征直接反映了波浪与潮流共同作用下的水动力环境。为揭示潮流对研究区床面动力条件的影响,分析了不同作用条件下床面剪切应力的分布特征。

根据模型计算结果(图 15),在仅考虑波浪作用时,研究区床面剪切应力主要分布在 0.6-1.4Pa 内,高值区主要集中在近岸浅水带及浅滩向深水过渡的水深变化较为显著的岸段。随着向外海推进,水深逐渐加深,床面剪切应力整体呈逐渐衰减趋势,反映出近岸波浪破碎及其伴随的能量耗散过程对床面动力条件起主导作用。仅考虑潮流作用时,其床面剪切应力主要分布在 0.1-0.4Pa 内,约为波浪作用下剪切应力的 10%-30%。在局部地形起伏较大、岸段坡度较陡的区域,潮流引起的床面剪切应力的数值可达 0.4-0.6Pa,表现出明显的空间非均匀性。波浪与潮流共同作用下,床面剪切应力整体水平较潮流单一动力作用条件普遍提高,其分布范围扩展至 0.8-1.9Pa,高值区空间范围明显扩大,尤其在浅滩向深水过渡、水深变化较为显著的岸段表现更为突出,表明在地形影响条件下,波流叠加效应对床面动力扰动具有增强作用。

为分析波流共同作用下床面切应力的变化,在研

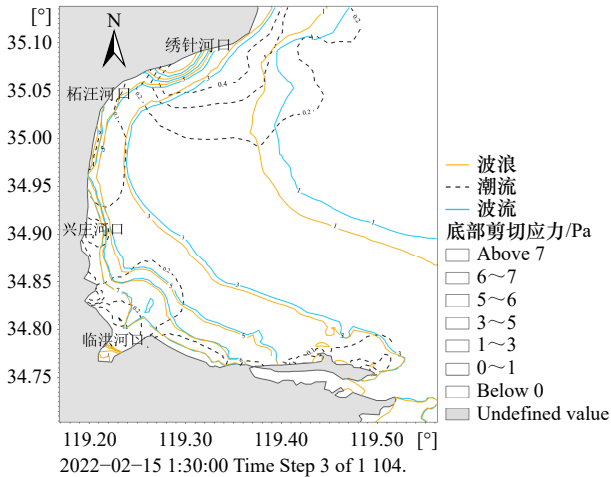


图 15 不同作用条件下底部剪切应力分布
 Fig. 15 Distribution of Bed Shear Stress under Different Forcing Conditions

究区沿岸选取特征点(图 16),对比分析波浪作用与波流共同作用条件下床面剪切应力的变化。结果表明,在地形较陡的北部岸段,波流共同作用下床面剪切应力较波浪单一作用条件提高约 13.3%–20.1%,对应的绝对增量约为 0.25–0.35 Pa;而在地形较平缓的南部岸段,床面剪切应力增幅普遍小于 0.15 Pa。整体沿岸由北向南逐渐减小,表明潮流增强效应在不同地形条件下存在明显的空间差异。

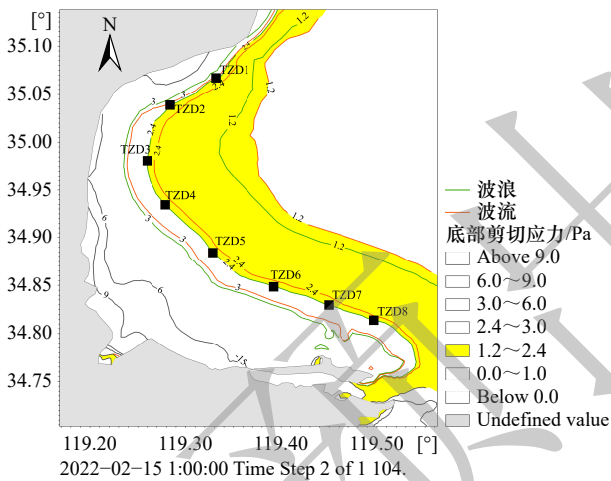


图 16 不同作用条件下闭合水深和起动手深所对应的剪切应力分布
 Fig. 16 Bed shear stress distribution corresponding to depth of closure and incipient motion depth under different forcing conditions

4.2 闭合水深空间分布与变化特征

在历史地形演变分析的基础上,基于数值模拟结果,进一步分析波浪及波流共同作用下海州湾闭合水深的空间分布特征。

据底质取样结果显示(图 19、图 20),研究区沉积

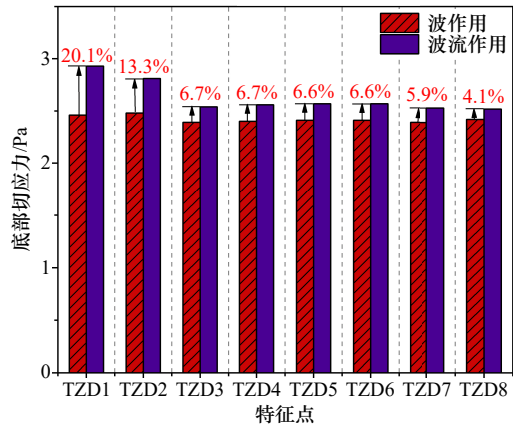


图 17 波作用和波流作用下底部剪切应力变化对比图
 Fig. 17 Comparison of bed shear stress under wave and wave-current action

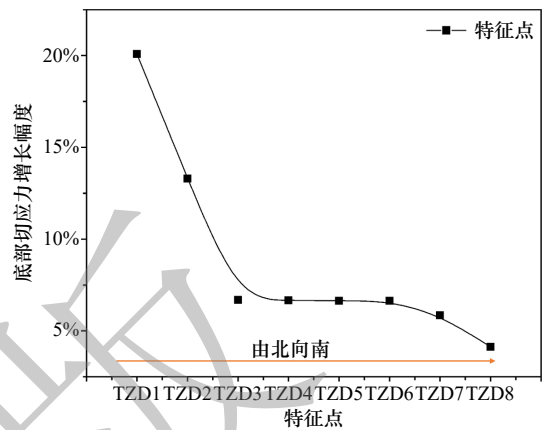


图 18 波作用和波流作用下底部剪切应力变化幅度图
 Fig. 18 Variation of bed shear stress under wave and wave-current action

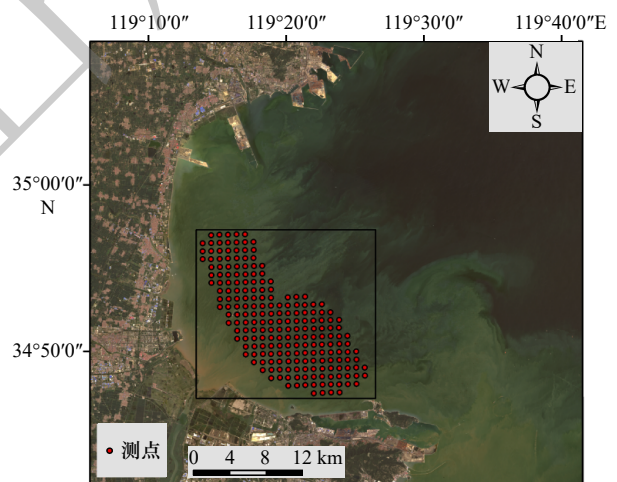


图 19 海州湾海域海床沉积物测点分布
 Fig. 19 Distribution of seabed sediment sampling stations in Haizhou Bay

物以粘土质粉砂为主,中值粒径主要分布在 0.008–0.013 mm。选取中值粒径 $D_{50} = 0.01$ mm 作为计算参

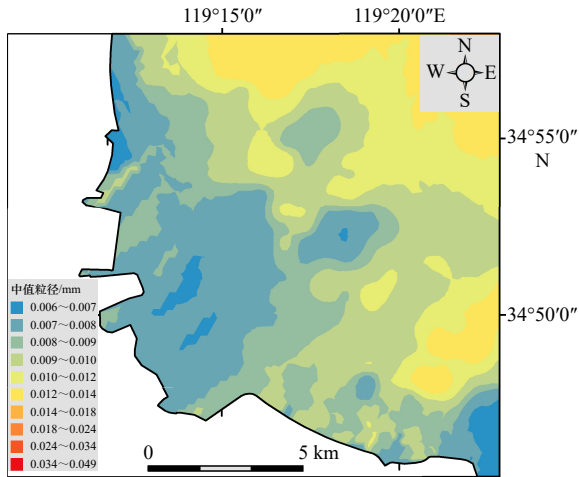


图 20 海州湾海床沉积物粒径分布

Fig. 20 Grain-size distribution of seabed sediments in Haizhou Bay

动切应力为 1.2 Pa, 因此, 采用 2.4 Pa 作为闭合水深的动力判定标准, 分析不同动力条件下闭合水深的空间分布特征。

为明确研究区闭合水深的实际范围, 结合研究区的历史地形数据对岸滩地形的长期演变进行了分析(图 21)。结果显示, 近岸浅水区域剖面形态变化较大, 随水深增加, 地形变化幅度逐渐减小。当水深超过一定阈值后, 床面形态趋于稳定, 其对应的水深范围集中在 8.9-9.8m, 与波流共同作用下计算结果基本一致, 证实了本文采用的闭合水深判定方法能较好地反映研究区岸滩地形的长期演变特征。为进一步验证闭合水深结果的空间一致性, 选取多个沿岸剖面进行对比分析(图 22), 结果反映出在模拟海州湾真实水文条件(波流共同作用)时, 闭合水深线分布范围与观测值极为接近, 误差在 5% 以内, 表明本模型模拟结果具有相对可靠性。

数, 依据希尔兹曲线计算得到研究区沉积物的临界起

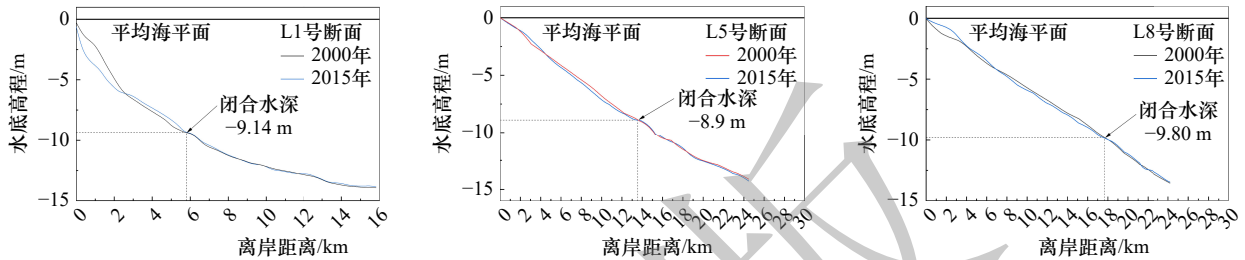


图 21 海州湾多年地形剖面对比图

Fig. 21 Comparison of multi-year topographic profiles in Haizhou Bay

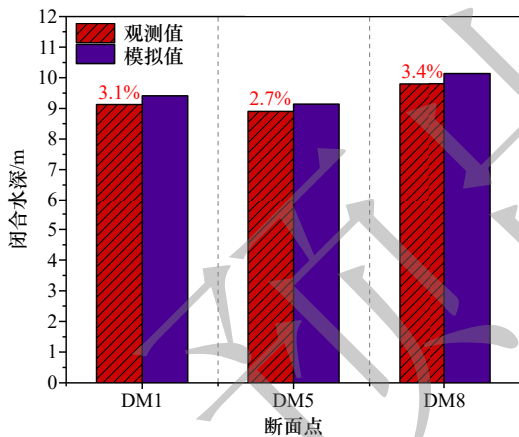


图 22 观测和模拟闭合水深对比图

Fig. 22 Comparison of observed and simulated depth of closure

将床面剪切应力分布与泥沙起动判据对比, 得到不同动力条件下的闭合水深空间分布特征(图 23)。按照传统的闭合水深计算方法, 在仅考虑波浪作用时, 研究区闭合水深主要分布在 7.8-9.2 m 范围内, 且沿岸变化幅度较小。而在波流共同作用下, 增强了床

面剪切应力, 使满足判据的水深范围向外海扩展, 整体分布范围延伸至 8.0-10.1 m。在北部地形坡度较陡、波流能量叠加明显的岸段闭合水深外移较为明

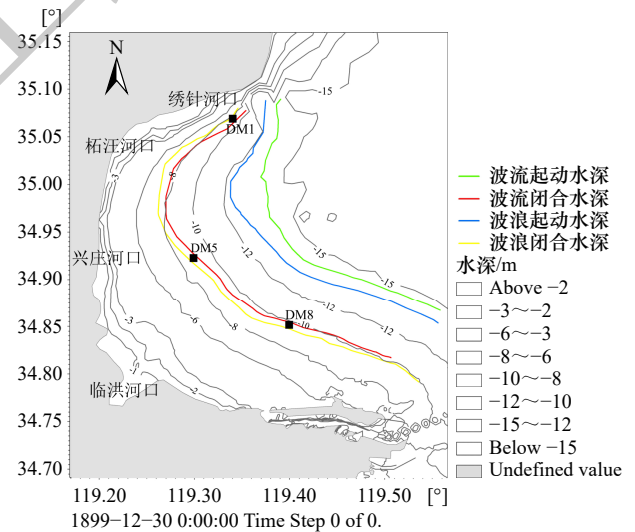


图 23 不同作用条件下闭合水深和起动水深分布

Fig. 23 The depth of closure and incipient motion depth under different forcing conditions

显,局部水深可接近 10 m。结合图 24 对比发现,波流共同作用下的闭合水深相较波浪作用条件整体加深 0.4–1.3 m,平均增幅约为 0.7 m。其中在地形坡度较陡的北部岸段增幅整体高于地形平缓的南部岸段,表明其空间差异除受潮流强度影响外,还与岸滩坡度密切相关。

从动力机制分析,岸滩坡度通过调制波浪能量耗

散及潮流结构,对床面剪切应力的空间分布具有重要控制作用。在北部坡度较陡岸段,水深变化剧烈,波浪易于集中破碎并快速耗散,增强近底水体运动;同时地形收缩效应使潮流流速增大,强化波浪叠加作用,提高床面剪切应力,使泥沙在较浅水深即可达到持续输运条件,闭合水深增幅主要集中在 0.9–1.3 m。相比之下,南部岸段坡度平缓,波浪能量逐渐耗散,近

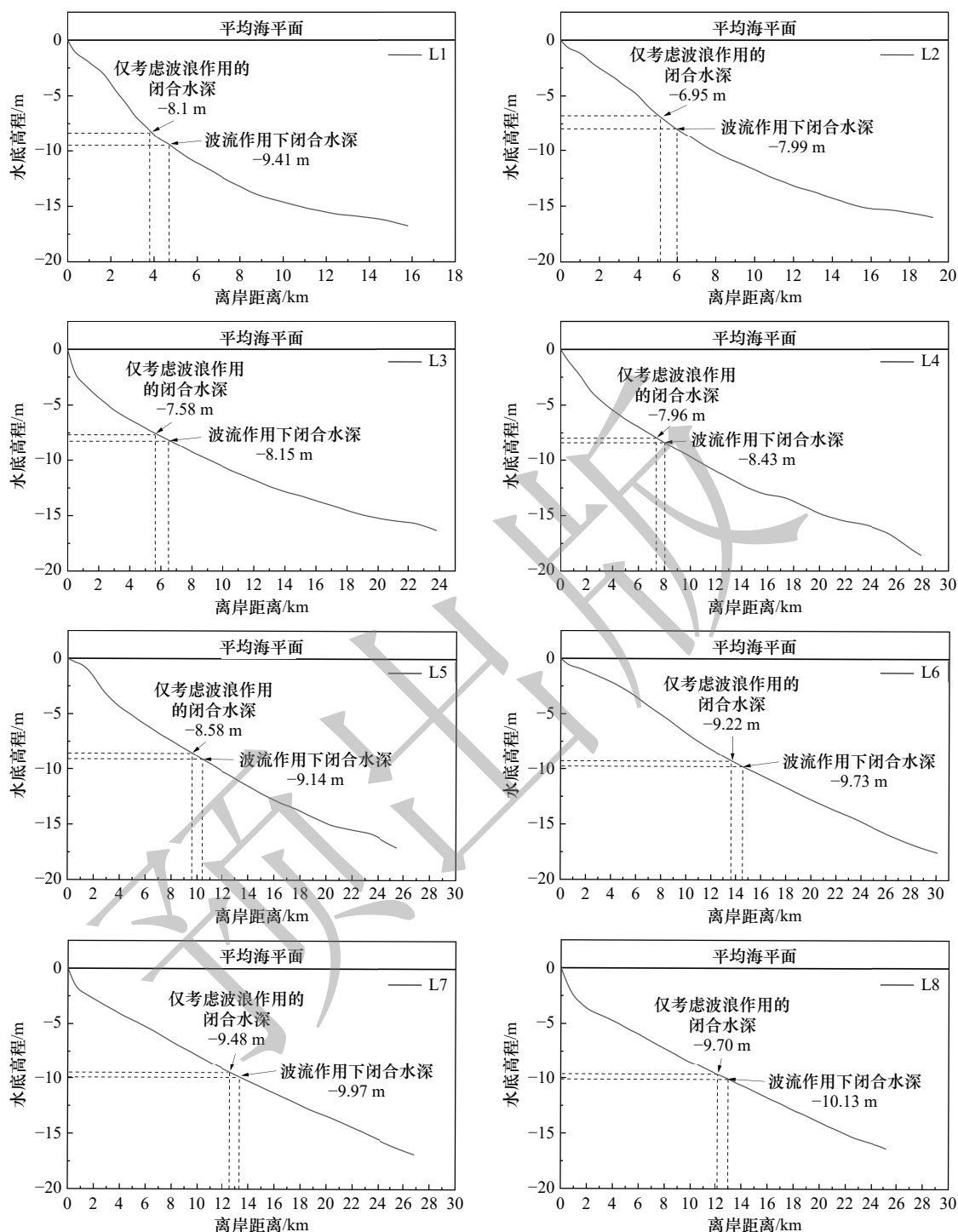


图 24 断面地形对应波浪和波流作用下的闭合水深

Fig. 24 The depth of closure corresponding to the topography of the section under the action of wave and wave-current

底动力作用较弱;同时潮流流速分布较为均匀,难以形成局部增强效应,导致床面剪切应力随水深快速衰减,因此需在更深水区域才能满足泥沙输运条件,闭合水深向外海延伸但增幅通常小于 0.6 m。

综上,波流共同作用增强了床面剪切应力并推动闭合水深整体外移,而岸滩坡度则通过调制波能耗散与潮流结构进一步强化其空间差异,表明闭合水深的形成受波浪、潮流与地形的共同控制。

5 结论与展望

本研究构建了波流共同作用的海州湾水沙动力数学模型,计算了海州湾海域海床床面剪切应力分布情况,根据泥沙临界起切应力和闭合水深之间的关系,绘制出海州湾区域的闭合水深分布图,揭示了潮汐动力对海州湾闭合水深的影 响。研究结论如下:

(1)海州湾床面剪切应力由波浪与潮流共同调控,波浪在近岸浅水区占主导,潮流可增强部分岸段近底动力条件。与单一波浪作用相比,波流共同作用下床面剪切应力整体提升,分布范围扩展至 0.8–1.9 Pa,且增强幅度由北向南递减,北部地形收敛岸段增幅

达 13.3%–20.1%,南部平缓岸段增幅较小。

(2)仅考虑波浪时,海州湾闭合水深主要分布在 7.8–9.2 m;纳入潮流后,闭合水深向外海推进,整体分布范围扩展至 8.0–10.1 m。对比不同岸段后发现,波流共同作用下的闭合水深相较波浪作用条件整体加深 0.4–1.3 m,平均增幅约 0.7 m。其中北部地形收敛岸段增幅集中在 0.9–1.3 m,南部平缓岸段增幅多小于 0.6 m,差异源于地形变化海洋动力的影响。

(3)选取的海图数据时间跨度达 15 年,可在一定程度上反映研究区岸滩地形演变趋势,但仍难以完全刻画闭合水深的分布特征。为降低该不确定性,本文结合沉积物特征分析及数值模拟结果,对闭合水深进行了多方法交叉验证。历史海图水深对比显示海州湾实际闭合水深范围为 8.9–9.8m,波流作用下模拟值与实测值高度吻合,误差范围在 5% 内,验证了结果的可靠性。研究揭示潮流对闭合水深分布的重要影响,强调了在中型潮汐海湾中不可忽视潮流作用。而后续研究中,有必要进一步整合多时相高精度地形资料,开展长时间序列分析,以更全面地揭示闭合水深的演变规律。

参考文献:

- [1] 付标,秦茜,曾维特,等. 三亚崖州湾海岸侵蚀淤积特征及演变预测分析[J]. *海洋地质*, 2024, 40(12): 76–88.
Fu Biao, Qin Han, Zeng Weite, et al. Characteristics of coastal erosion, siltation, and future development in Yazhou Bay, Sanya[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2024, 40(12): 76–88.
- [2] 陈君,林祥. 江苏海岸侵蚀及其防护工程研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(5): 1–6,31.
Chen Jun, Lin Xiang. Research progress on coastal erosion and protection engineering in Jiangsu Province[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(5): 1–6,31.
- [3] 梁东,高娜,英晓明,等. 基于 LSTM 构建海岸侵蚀风险预测模型的研究及应用[J]. *海洋学报*, 2024, 46(6): 130–140.
Liang Dong, Gao Na, Ying Xiaoming, et al. Research and application of constructing a coastal erosion risk prediction model based on LSTM[J]. *Haiyang Xuebao*, 2024, 46(6): 130–140.
- [4] 魏霞,高伟,李萍,等. 山东半岛东部典型砂质海岸侵蚀特征及其影响因素[J]. *海洋科学进展*, 2024, 42(2): 312–324.
Wei Xia, Gao Wei, Li Ping, et al. Erosion characteristics and influencing factors of typical sandy coasts in the eastern Shandong Peninsula[J]. *Advances in Marine Science*, 2024, 42(2): 312–324.
- [5] 章志,刘宪光,周凯,等. 海岸侵蚀脆弱性及驱动因子分析——以江苏中部海岸为例[J]. *海洋学研究*, 2023, 41(4): 70–83.
Zhang Zhi, Liu Xiangang, Zhou Kai, et al. Vulnerability and driving factors of coastal erosion: a case study of the central coast of Jiangsu[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2023, 41(4): 70–83.
- [6] 王庆,朱君,战超. 海岸侵蚀与防护技术研究进展[J]. *海岸工程*, 2022, 41(4): 301–312.
Wang Qing, Zhu Jun, Zhan Chao. Research progress of coastal erosion and protection technology[J]. *Coastal Engineering*, 2022, 41(4): 301–312.
- [7] 王艳红,曾成杰,陆培东,等. 三亚湾东段海岸侵蚀与海滩养护[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(4): 1049–1060.
Wang Yanhong, Zeng Chengjie, Lu Peidong, et al. Beach erosion and nourishment in the east section of Sanya Bay, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(4): 1049–1060.
- [8] Kraus N C, Larson M, Wise R A. Depth of closure in beach-fill design[J]. *Coastal Engineering*, 1998, 40: 271–286. (查阅网上资料,未找到本条文献信息,请确认)
- [9] Nicholls R J, Birkemeier W A, Lee G H. Evaluation of depth of closure using data from Duck, NC, USA[J]. *Marine Geology*, 1998, 148(3/4): 179–201.
- [10] Hartman M, Kennedy A B. Depth of closure over large regions using airborne bathymetric Lidar[J]. *Marine Geology*, 2016, 379: 52–63.
- [11] Hinton C, Nicholls R J. Spatial and temporal behaviour of depth of closure along the Holland coast[C]//*Coastal Engineering 1998*. ASCE,

- 1999: 2913–2925. (查阅网上资料, 未找到出版地信息, 请确认补充)
- [12] Hallermeier R J. Calculating a Yearly Limit Depth to the Active Beach Profile[M]. Coastal Engineering Research Center, 1977: 28. (查阅网上资料, 未找到对应的出版地信息, 请确认补充)
- [13] Hallermeier R J. Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion[C]//Coastal Engineering 1978. ASCE, 1978: 1493–1512. (查阅网上资料, 未找到对应的出版地信息, 请确认补充)
- [14] Hallermeier R J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate[J]. Coastal Engineering, 1980-1981, 4: 253–277. (查阅网上资料, 年份信息不确定, 请确认)
- [15] Aragonés L, Pagán J I, López I, et al. Depth of closure: new calculation method based on sediment data[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2018, 33(2): 198–207.
- [16] 应铭, 李九发, 陈沈良, 等. 黄河三角洲飞雁滩动力特征与地形剖面塑造[J]. *海洋通报*, 2007, 26(4): 13–22.
Ying Ming, Li Jiufa, Chen Shenliang, et al. Dynamics characteristics and topographic profiles shaping process of Feiyantan at the Yellow River Delta[J]. *Marine Science Bulletin*, 2007, 26(4): 13–22.
- [17] 戴志军, 张小玲, 闫虹, 等. 台风作用下淤泥质海岸动力地貌响应[J]. *海洋工程*, 2009, 27(2): 63–69,95.
Dai Zhijun, Zhang Xiaoling, Yan Hong, et al. Morphodynamic behavior of the mud coast in response to typhoon action[J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(2): 63–69,95.
- [18] 陈西庆, 陈吉余. 长江三角洲海岸剖面闭合深度的研究——Bruun 法则及其应用的基本问题[J]. *地理学报*, 1998, 53(4): 323–331.
Chen Xiqing, Chen Jiyu. A study of closure depth on the profiles of the Changjiang Deltaic coast——on the fundamental problems associated with Bruun rule and its application[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1998, 53(4): 323–331.
- [19] 张玮. 河流动力学[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Zhang Wei. *Heliu Donglixue*[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013. (查阅网上资料, 未找到对应的英文翻译, 请确认)
- [20] 沈昆明, 李安龙, 蒋玉波, 等. 基于数字岸线分析系统的海岸线时空变化速率分析——以海州湾为例[J]. *海洋学报*, 2020, 42(5): 117–127
Shen Kunming, Li Anlong, Jiang Yubo, et al. Time-space velocity analysis of coastline based on digital shoreline analysis system: a case study of the Haizhou Bay[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(5): 117–127.
- [21] Short A D. Macro-meso tidal beach morphodynamics: an overview[J]. *Journal of Coastal Research*, 1991, 7(2): 417–436.
- [22] Yang B C, Dalrymple R W, Chun S S. Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: summer tidal flat-winter shoreface[J]. *Sedimentology*, 2005, 52(2): 235–252.
- [23] Masselink G, Kroon A, Davidson-Arnott R G D. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings — A review[J]. *Geomorphology*, 2006, 73(1/2): 33–49.
- [24] Pais-Barbosa J, Veloso-Gomes F, Taveira-Pinto F. Coastal features analysis using GIS tools-stretch Esmoriz-Furadouro[J]. *Journal of Coastal Conservation*, 2012, 16(3): 269–279.
- [25] 王娜. 非线性波浪作用下岸滩横向输沙计算方法研究[D]. 连云港: 江苏海洋大学, 2022.
Wang Na. Study on the calculation method of sand beach evolution under nonlinear waves[D]. Lianyungang: Jiangsu Ocean University, 2022.
- [26] 中华人民共和国交通运输部. JTS 145-2015, 港口与航道水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTS 145-2015, Code of hydrology for Harbour and waterway[S]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [27] Nicholls R J, Birkemeier W A, Hallermeier R J. Application of the depth of closure concept[C]//Coastal Engineering 1996. ASCE, 1996: 3874–3887. (查阅网上资料, 未找到对应的出版地信息, 请确认补充)
- [28] Valiente N G, Masselink G, Scott T, et al. Role of waves and tides on depth of closure and potential for headland bypassing[J]. *Marine Geology*, 2019, 407: 60–75.
- [29] 邹志利. 海岸动力学[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
Zou Zhili. *Coastal Hydrodynamics*[M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [30] Soulsby, R. Dynamics of Marine Sands[M]. London: Thomas Telford Publishing, 2000. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认)
- [31] Madsen O S, Grant W D. Sediment Transport in the Coastal Environment[M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1976: 209.
- [32] 罗浩. SWAN 模式渤海湾海浪数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Luo Hao. Research on numerical simulation wave in Bohai bay by SWAN model[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [33] 王斌. 曹妃甸围海造地二维潮流数值计算及滩槽稳定性研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
Wang Bin. Numerical simulation of the Shoal reclamation in Caofeidian and the study of the stability around the Shoal and deep though after reclamation[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [34] 李瑞杰, 罗锋, 朱文谨. 悬沙运动方程及其近底泥沙通量[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2008, 38(11): 1995–2000.
Li Ruijie, Luo Feng, Zhu Wenjin. The suspended sediment transport equation and its near-bed sediment flux[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, 52(2): 387–391.

- [35] Soulsby R L, Hamm L, Klopman G, et al. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer[J]. *Coastal Engineering*, 1993, 21(1/3): 41–69.
- [36] Fredsøe J. Turbulent boundary layer in wave-current motion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(8): 1103–1120.
- [37] Hands E B, Allison M C. Mound migration in deeper water and methods of categorizing active and stable depths[C]//*Coastal Sediments*. ASCE, 1999. (查阅网上资料, 未找到对应的出版信息, 请确认补充)

Study on Closure Depth of Cross-Shore Sediment Transport in Haizhou Bay, a Mesotidal Embayment

Zhu Wenjin¹, Tang Xia¹, Dong Xiaotian¹, Mo Chunyan¹, ZhangYang¹

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: The depth of closure is a key parameter in studies of sediment budget balance and coastal morphodynamics, and plays an important role in coastal erosion-related engineering applications. Traditional methods for estimating the depth of closure are mostly developed for wave-dominated coasts and generally neglect the influence of tidal currents, which limits their applicability to mesotidal embayments. Taking Haizhou Bay in the Lianyungang coastal area as a case study, this study systematically investigates the influence of tidal currents on the depth of closure by integrating field observations, numerical simulations, and theoretical analysis. The numerical results indicate that tidal currents in Haizhou Bay exhibit a decreasing trend from north to south, and that tidal forcing significantly enhances nearshore sediment mobilization. Under combined wave-current conditions, the depth of closure is estimated to range from 8.0 to 10.1 m, representing an increase of 0.4–1.3 m compared with the wave-only condition. Comparisons with historical bathymetric charts suggest that the observed depth of closure in Haizhou Bay generally falls within the range of 8.9–9.8 m, which is in good agreement with the results obtained in this study, further demonstrating the reliability of the proposed approach. The new method highlights the role of tidal currents in increasing bed shear stress in mesotidal embayments and explicitly accounts for their influence on the depth of closure, providing a sound scientific basis and technical support for coastal engineering applications in similar environments.

Key words: Haizhou Bay; Depth of closure; Incipient motion depth; Numerical simulation; Current influence