

侣同浩, 褚宏宪, 孙菲菲, 等. 曹妃甸南部海域表层沉积物侵蚀特征[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(2): 92-104.

SI Tonghao, CHU Hongxian, SUN Feifei, et al. Study on erosion characteristics of surface sediments in southern Caofeidian[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(2): 92-104.

曹妃甸南部海域表层沉积物侵蚀特征

侣同浩¹, 褚宏宪², 孙菲菲¹, 白大鹏^{2*}, 朱龙海^{1,3}, 胡日军^{1,3}, 林超然¹

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000;

3 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要:近岸海域是海陆相互作用的敏感地带, 受自然和人类活动的共同影响, 沉积动力环境较为复杂。海底表层是水体和海底交互作用的关键界面, 表层沉积物侵蚀特征是影响海底冲淤演化的重要因子。本文利用于 2021 年 10 月在曹妃甸南部海域获取的 91 个表层沉积物样品及 10 个原状插管样, 通过粒度实验、室内 U-GEMS 微观侵蚀实验, 分析了研究区表层沉积物临界侵蚀剪应力及侵蚀速率的空间分布特征, 结合潮流数值模拟结果, 探讨了潮流作用下研究区表层沉积物侵蚀特征。结果表明: 表层沉积物临界侵蚀剪应力介于 $0.3 \sim 0.6 \text{ N/m}^2$, 曹妃甸周边区域表层沉积物临界侵蚀剪应力为 $0.45 \sim 0.6 \text{ N/m}^2$, 研究区东部及南部表层沉积物临界侵蚀剪应力相对较小, 为 $0.3 \sim 0.45 \text{ N/m}^2$ 。侵蚀速率随剪应力的增大总体呈线性增加趋势, 侵蚀速率最大值为 $0.059 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。研究区内表层沉积物侵蚀特征受到潮流作用和表层沉积物可侵蚀性的影响。该研究有利于从沉积物侵蚀特征方面丰富近海冲淤演化理论, 对于近岸工程建设和海岸防护具有一定指导意义。

关键词:表层沉积物; 可侵蚀性; 微观侵蚀实验; 数值模拟; 曹妃甸

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.039

0 引言

海洋沉积物由砾石、砂、粉砂和黏土等不同大小的颗粒及有机质等组合而成^[1]。不同组分的表层沉积物可侵蚀性存在差异, 其沉积物起动、运移规律会有所不同^[2]。表层沉积物可侵蚀性受粒度特征^[2-3]、黏聚力^[4]、固结程度^[5-6]、环境温度^[7-8]、生物活动^[9-10]、湍流^[11]等多种因素的影响。临界侵蚀剪应力(τ_{ce})、侵蚀速率(E)是表征表层沉积物可侵蚀性的 2 个重要参数^[12], 现场观测获取沉积物可侵蚀性数据较为困难, 故通过室内侵蚀实验获取以上 2 个参数是目

前沉积物可侵蚀性研究的重要手段^[13-14]。

潮流作用于海底表层沉积物, 会产生剪应力, 当潮流与海底沉积物作用所产生的流致剪应力超过沉积物临界剪应力时, 表层沉积物会发生再悬浮^[15], 导致表层沉积物自身粒度特征发生变化, 进而影响区域内沉积物可侵蚀性^[16-17]。故流致剪应力会造成沉积物再悬浮、改变沉积物粒径及可侵蚀性, 进而反作用于沉积物的再悬浮, 导致沉积物侵蚀特征发生变化。

目前, 许多学者对河口潮滩区域的表层沉积物可侵蚀性进行了较为深入的研究^[14,18], 但河口地区沉积物特性和水动力条件与近海存在差异。前人^[19-20]针对曹妃甸近岸海域的泥沙输运机制开展了相关研究, 但主要集中于水动力条件对沉积物运移的响应, 无法体现表层沉积物自身侵蚀特征对泥沙起动的影响。本文通过在曹妃甸南部海域使用箱式取样器取得的原状插管样及表层沉积物样品, 采用表层沉积物粒度和 U-GEMS 微观侵蚀实验分析, 得出曹妃甸南部海域表层沉积物粒度特征及可侵蚀性

收稿日期: 2024-02-05

资助项目: 中国地质调查局项目“渤海曹妃甸海域 1:5 万海洋区域地质调查”(DD20211553), 国家自然科学基金(42276172)

第一作者: 侣同浩(1999—), 男, 在读硕士, 主要从事海洋沉积动力方面的研究工作. E-mail: 1303919038@qq.com

* 通讯作者: 白大鹏(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事海洋地球物理、海岸带地质调查方面的研究工作. E-mail: 527673119@qq.com

空间分布规律, 结合区域内潮流数值模拟结果计算得出的流致剪应力, 探讨了潮流作用下研究区表层沉积物侵蚀特征。该成果对于近岸沿海地区沉积物输送研究及海岸工程防护具有重要意义^[21]。

1 研究区概况

曹妃甸位于渤海湾北部, 地处渤海湾与辽东湾的交界处。研究区位于曹妃甸南部海域, “面向大海有深槽, 背靠陆地有浅滩”是曹妃甸独特的自然地理特征^[22]。曹妃甸为淤泥质海岸, 地形起伏大, 在河流和海洋水动力条件下形成了丰富的地貌类型, 发育有水下三角洲、潮流沙脊, 还有在强潮流作用下形成的深槽等地貌^[23], 曹妃甸甸头前侧的深槽水深可达 30 m 左右。曹妃甸岬角地貌特征明显, 其突出于海中, 对该区域的动力、地貌发育及泥沙运动等起着重要作用^[24]。研究区均为不正规半日

潮区, 潮差由西向东逐渐变小, 潮流为往复流。涨潮流向大致自东向西, 落潮流向大致自西向东, 且海域内最大流速均出现在涨潮时刻^[25]。曹妃甸海区以风浪为主, 常浪向为 SE、ESE 和 E 向, 受地形影响, 潮流、波浪及两者共同作用下的泥沙运动是影响海岸地貌发育演变与滩槽稳定性的主要动力因素^[22]。曹妃甸周边海域泥沙来源主要为滦河入海泥沙和沿岸岸滩及水下岸坡侵蚀泥沙的再搬运^[26-27]。

2 资料来源与研究方法

2.1 样品与数据来源

本文以 2021 年 10 月在曹妃甸南部海域采集的原状插管样以及表层沉积物为研究对象, 研究区域及采样站位见图 1。

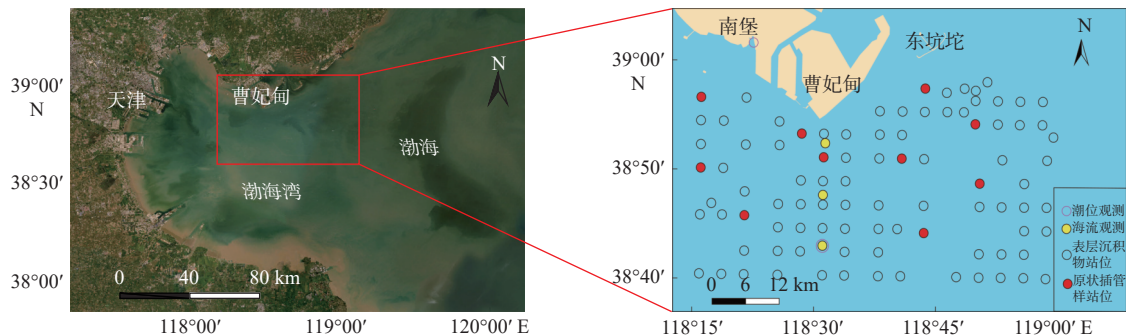


图 1 研究区域及采样站位

Fig.1 Study area and sampling stations

原状插管样根据室内实验仪器要求, 在进行野外取样时, 使用直径 11 cm 的 PVC 管进行取样。在箱式取样器采集泥样升达甲板后, 将 PVC 管从箱式取样器的顶部垂直插入, 考虑到在采集的过程中不可避免会对沉积物的原始状态造成扰动, 因此, 本研究中短柱沉积物样品的高度均 > 10 cm, 保证柱状样表面水平且保留 5 cm 左右的上覆海水, 以便于后期室内微观侵蚀实验产生有效的剪应力。表层沉积物样品采取箱式取样器表层 0~2 cm 的沉积物, 保存入真空聚乙烯袋中, 以备实验测试。

2022 年 7 月 30 日 16: 00—7 月 31 日 17: 00, 在曹妃甸南部海域进行了 3 船同步定点连续 25 h 海流观测 (图 1), 使用美国 LinkQuest 公司生产的 FlowQuest600kHz 多普勒海流剖面仪 (ADCP) 采集海流的方向、速度及水深等各项数据。ADCP 安装在船右舷后侧位置, 数据采样间隔为 10 min。

观测剖面按 0.5 m 分层, 根据实际测量深度 (H) 按 6 点法 (表层、0.2 H 、0.4 H 、0.6 H 、0.8 H 、底层) 进行数据提取。潮位观测使用中国中船海鹰加科海洋技术有限责任公司生产的海鹰 HY1300 全数字潮位仪, 数据采样间隔为 1 s。

2.2 微观侵蚀实验

U-GEMS 微观侵蚀系统 (图 2) 一般用于模拟现场环境下的一系列剪应力来测试未扰动沉积物的可侵蚀性, 目前国内外许多研究工作中都已经利用该系统来探讨不同因素对于表层沉积物可侵蚀性的影响^[5,21,26-29], 本研究中表层沉积物临界侵蚀剪应力就是通过该系统来确定的。

U-GEMS 微观侵蚀系统由电脑、主机箱、透光度仪、侵蚀头、水泵、输出和输入水管组成 (图 2)。其工作原理是通过电脑上 Water2Web 软件输入所

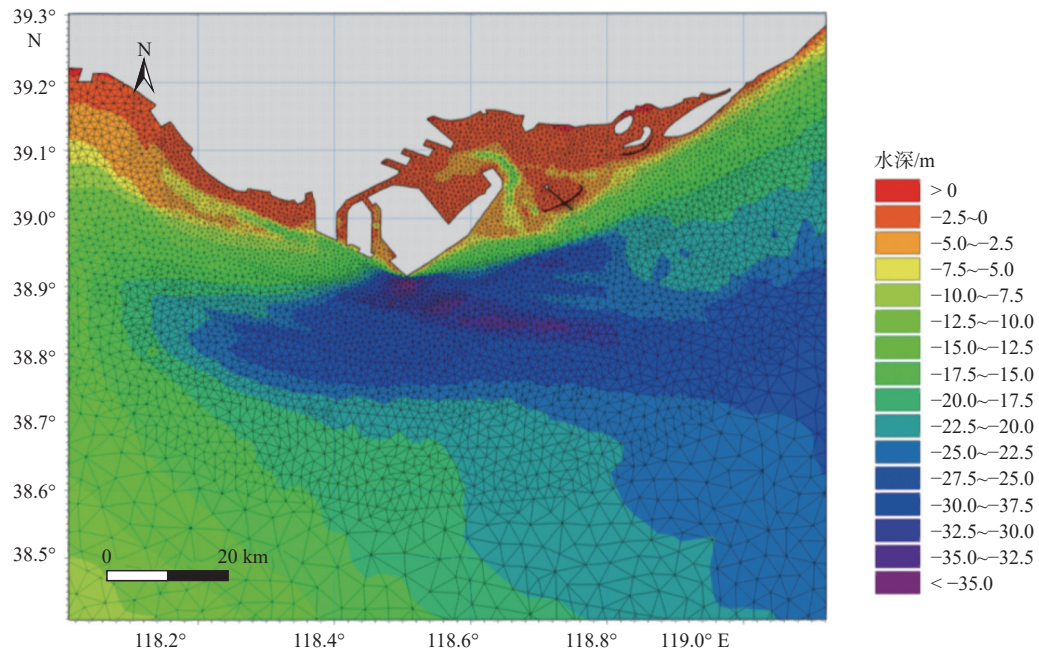


图 3 研究区计算域网格示意图

Fig.3 The computational domain grid diagram of the study area

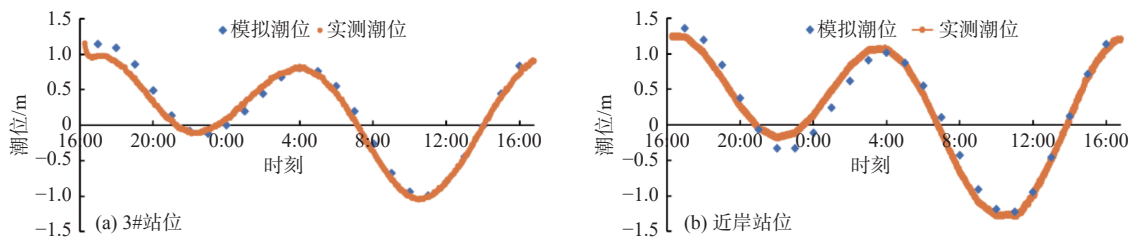


图 4 潮位验证曲线

Fig.4 Tidal level verification curve

单位时间面积内所侵蚀的沉积物质量^[36], 计算公式(4)如下。

$$E_{\tau} = \frac{m_{\tau}}{S \times t_{\tau}} \quad (4)$$

式中: E_{τ} 为表层沉积物侵蚀速率, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;

m_{τ} 为发生临界侵蚀后各阶段剪应力作用下的表层沉积物侵蚀质量, g ;

S 为表层沉积物的侵蚀面积, 实验中侵蚀面积为 $9.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$;

t_{τ} 为各剪应力阶段的持续时间, 实验中各阶段时间均为 900 s 左右。

3 结果与讨论

3.1 表层沉积物粒度特征

研究区内表层沉积物包括泥(M)、粉砂(Z)、粉砂质砂(zS)、砂质粉砂(sZ)4 种类型, 以粉砂(Z)、

粉砂质砂(zS)为主, 泥(M)和砂质粉砂(sZ)分布较少, 区域内表层沉积物类型中粉砂共计 53 个, 占比 58.2%; 粉砂质砂 25 个, 占比 27.5%; 砂质粉砂共计 7 个, 占比 7.7%; 泥共计 6 个, 占比 6.6%。沉积物类型大致呈条带状分布, 由岸向海依次分布有粉砂、粉砂质砂、砂质粉砂、粉砂(图 6a)。粉砂主要分布在曹妃甸周边区域及研究区南部; 粉砂质砂主要分布在研究区中部和东坑坨东南部; 砂质粉砂整体分布较为分散, 在曹妃甸东部及南堡南部呈斑块状分布; 泥主要呈斑块状分布在南堡南部和曹妃甸南部。

研究区内各粒度组分含量的分布如图 6b—d 所示, 黏土和粉砂的分布特征类似, 二者的高值区主要分布在曹妃甸周边区域以及研究区南部, 低值区基本分布在研究区东北部以及呈条带状分布研究区中部。与黏土和粉砂相比, 砂的空间分布情况正好相反。

粒度参数可用于判定水动力条件和识别沉积环境类型, 是沉积学研究中的一重要内容^[37]。研

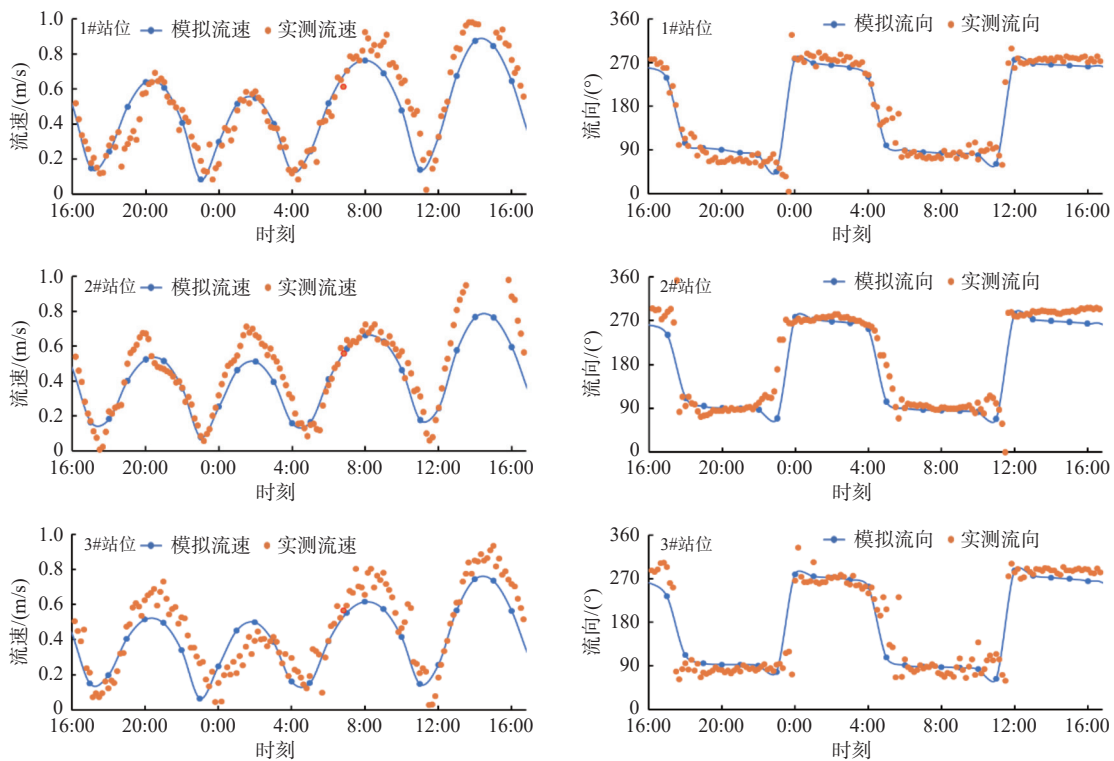


图5 2022年7月30日—7月31日流速(左)流向(右)验证曲线

Fig.5 Verification curve of flow velocity (left) and direction (right) during July 30-31, 2022

表1 流致剪应力计算公式参数一览表

Table 1 Parameter list of flow-induced shear stress calculation formula

参数	含义
u_*	摩阻流速, m/s
ρ	海水密度, g/cm ³
k	冯卡门常数
z_0	床层粗糙度
U	垂线平均流速, m/s
H	水深, m
$\bar{U}$	深度 z 处的水流平均速度, m/s

究区平均粒径、分选系数、峰态、偏态 4 个粒度参数的空间分布如图 7 所示。

研究区内表层沉积物平均粒径变化较大, 介于 $3.04\Phi \sim 8.23\Phi$, 平均为 6.13Φ 。平均粒径的分布与各沉积物类型之间存在较强的相关性, 研究区中部及曹妃甸东部以粉砂质砂为主, 其平均粒径相对较大, 在曹妃甸周边及研究区南部以粉砂和泥为主, 其平均粒径相对较小。表层沉积物平均粒径总体表现为由岸向海呈细-粗-细的变化趋势。

研究区内表层沉积物分选系数介于 1.18~2.91, 平均为 1.92。根据沉积物粒度参数分级标准, 区域内分选程度总体为较差—差。分选系数的分布与沉积物类型之间呈现较强的相关性, 曹妃甸东部区

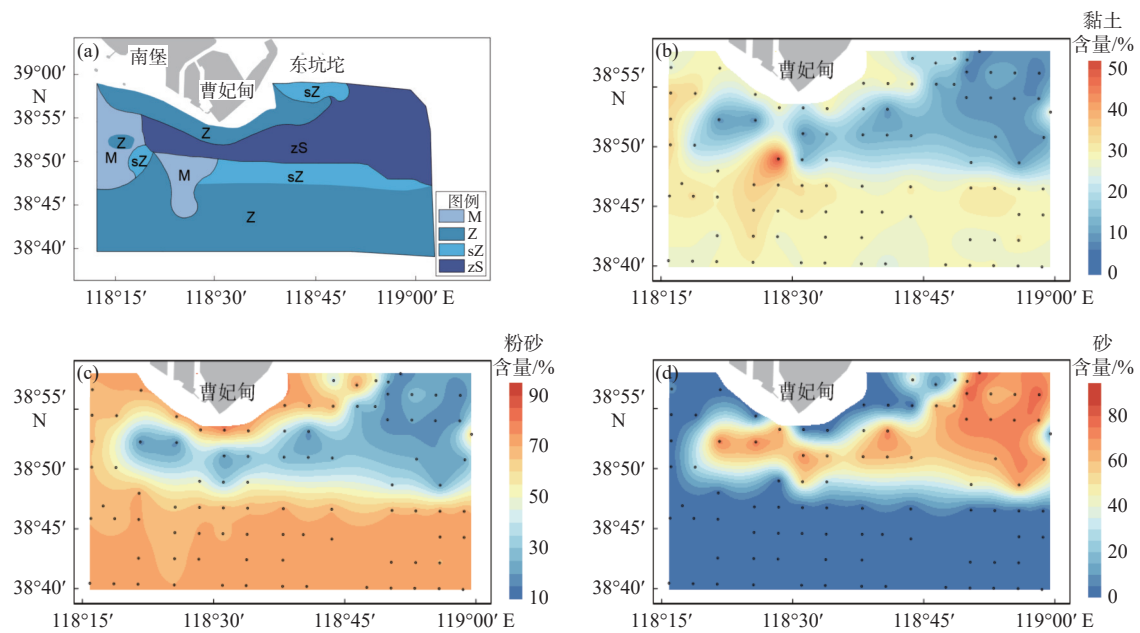
域及研究区中部分选系数较大, 分选差, 沉积物类型以粉砂质砂为主。曹妃甸近岸区域及研究区南部分选系数较小, 分选较差, 沉积物类型主要为粉砂, 以细颗粒组分粉砂和黏土为主。曹妃甸周边海域泥沙来源主要为滦河的人海泥沙和沿岸岸滩及水下岸坡侵蚀泥沙的再搬运^[26-27], 研究区沉积物分选差可能与不同物源的影响有关。

研究区内表层沉积物峰态值介于 0.66~1.96, 平均为 0.96, 较多站位表层沉积物峰态为宽—中等, 研究区中部站位的表层沉积物主要为宽峰态, 曹妃甸近岸及研究区南部为中等峰态。曹妃甸东部部分站位表层沉积物峰态变窄, 为窄峰态。

研究区内表层沉积物偏态值介于 -0.19~0.72, 平均为 0.3, 为负偏到极正偏。在曹妃甸近岸区域偏态值较低, 介于 -0.19~0.1, 为负偏到近对称, 该沉积物中细颗粒组分含量较高。研究区南部偏态值介于 0.1~0.3, 沉积物中粗颗粒的组分相对增加。偏态值的高值区主要呈条带状分布于研究区中部, 偏态值 > 0.3, 为极正偏, 以粉砂质砂为主, 沉积物中粗颗粒占比较高。

3.2 沉积物可侵蚀性

在泥沙运动力学中, 泥沙起动的判别标准一般



(a) 表层沉积物类型分布; (b) 黏土含量分布; (c) 粉砂含量分布; (d) 砂含量分布

图 6 表层沉积物类型及粒度组分百分含量分布

Fig.6 Surface sediment types and percentage distribution of grain size components

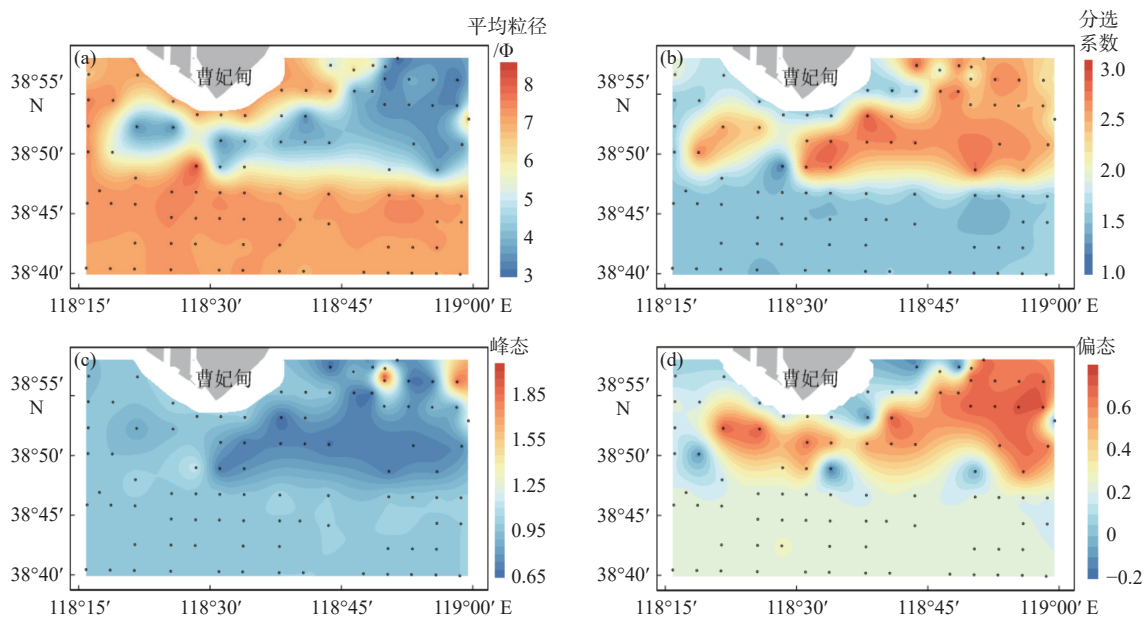


图 7 表层沉积物粒度参数分布

Fig.7 Distribution of grain size parameters of surface sediments

分为“个别起动”、“少量起动”和“大量起动”^[38]。由于研究区域及表层沉积物性质的不同, 临界侵蚀的判断标准存在较大差异。部分学者根据沉积物发生侵蚀时上覆水浊度的变化作为判断标准^[21], 或以沉积物表面发生侵蚀的状态进行判定^[39-40]。当使用侵蚀速率作为临界侵蚀剪应力的判断标准时, 侵蚀速率的判定标准为 $0.01 \sim 0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[7,41-42]。本文结合实验过程中的现象, 将侵蚀速率达到 $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的剪切力作为沉积物的临界侵蚀剪

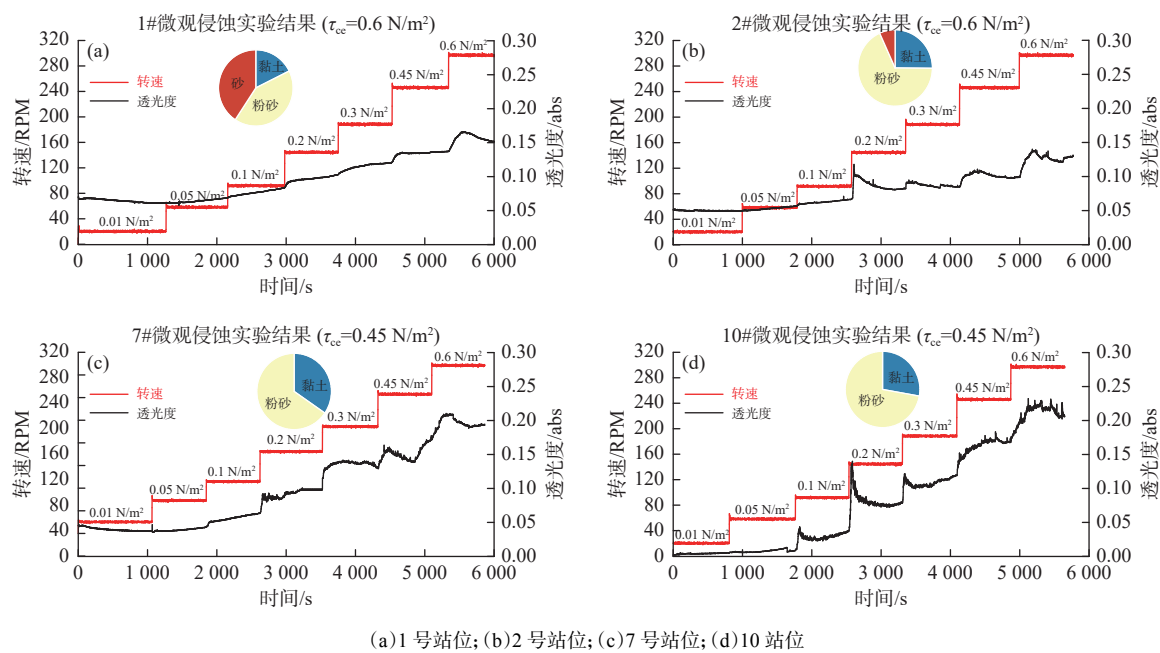
应力, 各站位临界侵蚀剪应力结果如表 2 所示。对实验结果处理后, 部分典型站位结果图如图 8 所示。

研究区内各站位不同剪应力下的侵蚀速率及实验中判断得出的临界侵蚀剪应力空间分布情况如图 9 所示。曹妃甸近岸的站位, 其底质类型以粉砂为主, 临界侵蚀剪应力较大, 各站位基本 $\geq 0.45 \text{ N/m}^2$, 水动力机械分选沉积物的同时, 也改变了海床临界侵蚀剪应力, 当海床基本冲淤平衡时, 临界侵蚀剪应力与水动力条件基本呈正比^[43], 甸头附近的冲刷

表 2 沉积物粒度特征及临界侵蚀剪应力

Table 2 Sediment grain size characteristics and critical erosion shear stress

站位	沉积物类型	平均粒径/ μm	黏土/%	粉砂/%	砂/%	临界侵蚀剪应力/(N/m^2)
1	砂质粉砂	28.56	17.69	41.61	40.70	0.6
2	粉砂	10.10	25.15	68.07	6.78	0.6
3	粉砂质砂	92.14	8.06	17.89	74.05	0.3
4	粉砂	7.65	28.58	70.48	0.94	0.6
5	粉砂质砂	84.79	8.90	20.47	70.63	0.45
6	粉砂质砂	59.54	12.71	25.99	61.31	0.45
7	泥	5.64	34.62	65.39	0.00	0.45
8	砂质粉砂	28.36	17.13	38.96	43.92	0.45
9	粉砂	6.62	29.68	70.32	0.00	0.45
10	粉砂	7.04	27.80	72.20	0.00	0.45



(a) 1 号站位; (b) 2 号站位; (c) 7 号站位; (d) 10 站位

图 8 典型站位微观侵蚀实验结果

Fig.8 Micro-erosion experimental results

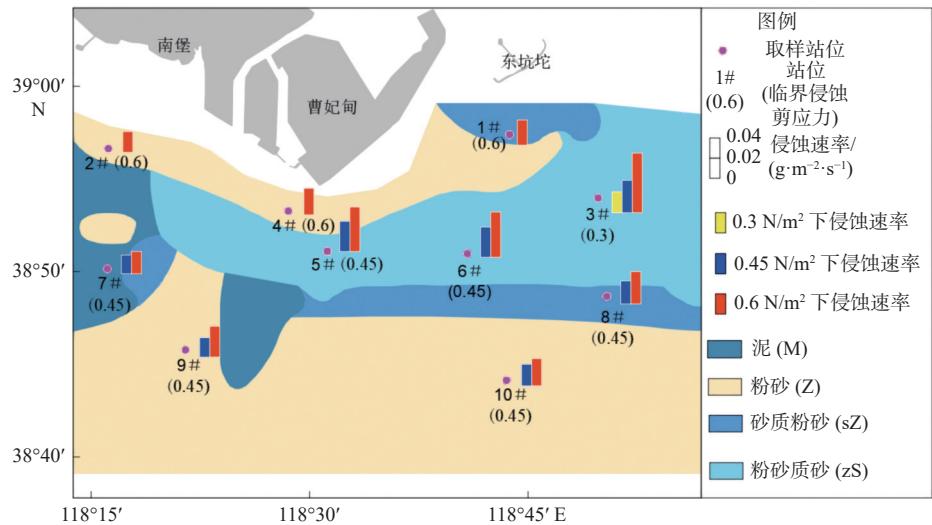


图 9 侵蚀速率及临界侵蚀剪应力分布

Fig.9 Erosion rate and critical erosion shear stress distribution diagram

环境导致其临界侵蚀剪应力较大。研究区中部底质类型为粉砂质砂, 其临界侵蚀剪应力相对较小, 最大临界侵蚀剪应力为 0.45 N/m^2 , 其中部分站位为 0.3 N/m^2 。由研究区中部向外表层沉积物中细颗粒组分含量增加, 各站位临界侵蚀剪应力也相对增大。在侵蚀速率分布方面, 0.3 、 0.45 、 0.6 N/m^2 下各站位中最大的侵蚀速率分别为 0.0226 、 0.0334 、 $0.059 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 侵蚀速率的分布与临界侵蚀剪应力相关性较强, 临界侵蚀剪应力较大的站位, 其侵蚀速率相对较低, 超出临界侵蚀剪应力后, 侵蚀速率随剪应力的增大进一步增大。

由于部分站位在 0.3 和 0.45 N/m^2 2 个剪应力阶段下不存在侵蚀速率, 故本研究对 0.6 N/m^2 剪应力阶段下侵蚀速率与平均粒径、表层沉积物各组分含量进行了 Pearson 相关性分析。结果表明, 表层沉积物可侵蚀性与粒度特征相关性较为显著, 0.6 N/m^2 阶段下侵蚀速率与平均粒径 ($R_2 = -0.810$) 及黏土 ($R_2 = -0.773$) 和粉砂 ($R_2 = -0.819$) 的含量呈显著负相关, 与砂 ($R_2 = 0.813$) 的含量呈显著的正相关, 这与前人的研究基本保持一致^[3]。

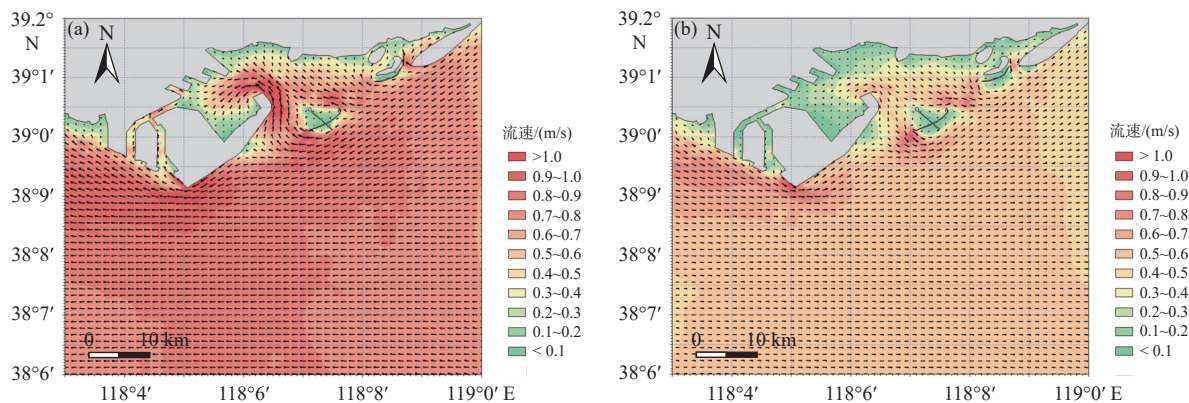
研究区内不同沉积物中细颗粒组分含量不同, 可侵蚀性存在差异。其中, 表层沉积物类型中的泥和粉砂, 其黏土和粉砂组分含量较高, 含量约 90%, 黏土和粉砂含量的增加会增大表层沉积物自身的黏聚力^[2,10], 进而降低沉积物的可侵蚀性, 使其侵蚀速率降低。粉砂质砂中粒度组分以砂为主, 黏土含量较低, 黏聚力作用相对较弱, 发生侵蚀所需的剪应力主要为克服沉积物颗粒自身的有效重力^[12,38]。在一定粒径范围内, 砂组分含量较高时, 黏土颗粒不足以补充粗颗粒之间的空隙, 沉积物侵蚀速率会增大, 即沉积物更易发生侵蚀^[13,18]。

3.3 潮流作用下沉积物侵蚀特征

根据潮流场数值模拟结果, 研究区大潮期潮流场分布情况如图 10 所示, 潮流整体呈往复流, 涨潮流向大致自东向西, 落潮流向大致自西向东, 且涨潮流速大于落潮流速。研究区大潮期涨急时刻潮流场分布特征: 曹妃甸东部沿岸区域潮流总体呈 SW 向, 在曹妃甸近岸浅滩内流速降低, 在甸头区域流向由 SW 向变为 NW 向, 距离甸头较远的南部区域潮流没有受到地形影响, 流向变化较小, 基本呈 E 向, 流速方面, 涨急时刻高流速区主要出现在甸头区域, 最大流速可达 1 m/s 左右。落急时刻潮流流向总体上与涨急时刻相反, 区域内总体流速小于涨急时刻流速且高流速区范围较涨急时刻减小。

根据数值模拟提取的一个大潮周期内不同站位各时刻潮流数据, 计算得出该区域内最大流致剪应力, 其分布如图 11 所示。人工构筑物的建设会引起潮流流向的偏转以及潮流流速的变化^[33], 围填海后甸头的岬角效应使该区域水动力进一步增强^[24], 进而导致甸头区域流致剪应力出现高值区, 流致剪应力 $> 0.6 \text{ N/m}^2$, 最大流致剪应力为 0.75 N/m^2 , 曹妃甸甸头向南最大流致剪应力呈减小的趋势, 其最大流致剪应力基本 $< 0.5 \text{ N/m}^2$; 在研究区东部区域为低值区, 其流致剪应力约 0.4 N/m^2 。

研究区各站位计算的流致剪应力 (τ_c) 与临界侵蚀剪应力 (τ_{ce}) 对比结果如图 12 所示。各站位流致剪应力时间变化序列在一个单周内伴随潮位变化均呈现出 4 次剪应力峰值。如前文所述, 研究区潮流性质为不规则半日潮, 因此与流速对应, 各站位流致剪应力的峰值变化特征基本类似, 该日内的



(a) 涨急时刻潮流场; (b) 落急时刻潮流场

图 10 研究区涨落潮流场分布 (大潮)

Fig.10 The distribution of flood tide and ebb tide in the study area (spring tide)

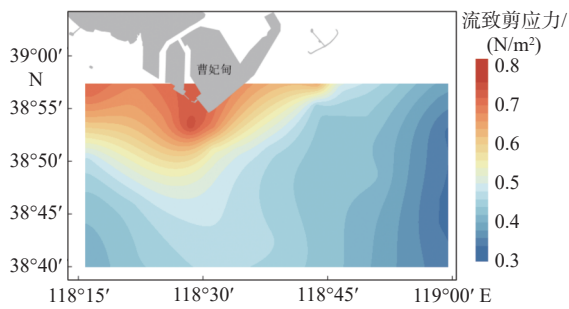


图 11 潮周期内最大流致剪应力分布

Fig.11 Distribution of maximum flow-induced shear stress in tidal cycle

第 2 次涨潮最大流致剪应力均大于第 1 次, 落潮特征与涨潮类似。根据各站位剪应力的对比关系 (图 12), 大潮期期间, 甸头区域部分时刻表层沉积物会发生一定程度的侵蚀, 侵蚀的持续时间约 2 h。其中, 3 号站位发生侵蚀的时间较长, 在第 2 次涨急落急时刻均发生约 2 h 的侵蚀, 研究区南部区域各站位在潮周期内均未发生侵蚀。

研究区涨落潮流流向大致呈 EW 向, 表层沉积物在涨急、落急等高流速时发生侵蚀, 再悬浮沉积物随潮流流速减小逐渐发生沉降。围填海后甸头

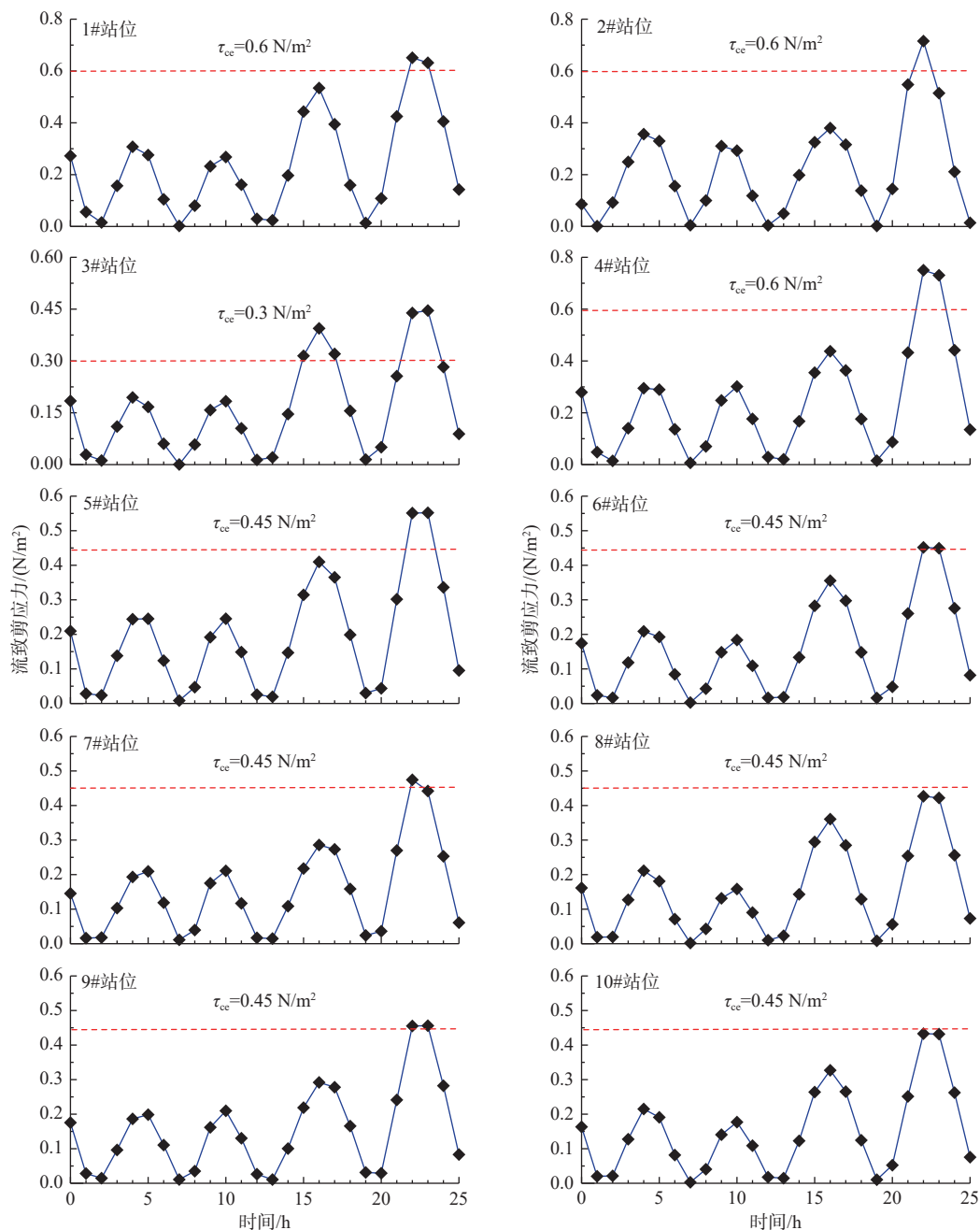


图 12 各站位流致剪应力与 U-GEMS 实验沉积物临界侵蚀剪应力值对比

Fig.12 Comparison of flow-induced shear stress and critical erosion shear stress of U-GEMS experimental sediments at each station

的岬角效应使水动力进一步增强, 流速增大导致流致剪应力增大, 曹妃甸海域大规模的工程建设导致浅滩水域面积减小, 进入深槽的泥沙有所减少^[44]。由于曹妃甸深槽区潮流作用较强, 其最大流致剪应力大于沉积物临界侵蚀剪应力, 导致甸头周边海区处于侵蚀状态^[45-46]。曹妃甸东部的 3 号站表层沉积物和 1 号站位相比, 黏土和粉砂含量较低, 砂含量较高, 3 号站位沉积物可侵蚀性增强, 其临界侵蚀剪应力(0.3 N/m^2)小于 1 号站位(0.6 N/m^2), 说明在一定粒径范围内, 表层沉积物可侵蚀性具有随砂含量的增加而逐渐增大的趋势^[3], 该区域内流致剪应力较小, 但沉积物可侵蚀性较强, 故在较小的潮流作用下也能发生部分侵蚀。研究区南部海域表层沉积物类型以粉砂为主, 黏土和粉砂含量较高, 黏聚力是影响其可侵蚀性的重要因素^[47], 同时区域流致剪应力较小, 故表层沉积物基本未发生起动, 该区域内未发生明显侵蚀。

研究区内水动力条件和表层沉积物的性质共同决定其潮流作用下的侵蚀特征。当潮流流速较大时, 临界侵蚀剪应力较大的沉积物也能发生侵蚀; 当流速较小时, 临界侵蚀剪应力较小的沉积物也能发生部分侵蚀。因此, 潮流作用是影响研究区表层沉积物侵蚀特征的重要因素。

4 结论

(1) 曹妃甸南部海域表层沉积物平均粒径介于 $3.04\Phi \sim 8.23\Phi$, 沉积物类型为泥、粉砂质砂、砂质粉砂与粉砂, 以粉砂和粉砂质砂为主, 粉砂主要分布于曹妃甸近岸及研究区南部, 粉砂质砂主要分布于研究区中部。分选程度为较差—差, 与沉积物类型存在较强的相关性, 峰态介于很宽到很窄, 偏态为负偏到极正偏。

(2) 研究区临界侵蚀剪应力介于 $0.3 \sim 0.6 \text{ N/m}^2$, 其中, 曹妃甸近岸临界侵蚀剪应力较大, 研究区中部临界侵蚀剪应力较小。侵蚀速率随施加剪应力的增大基本呈线性增加, 最大可达 $0.059 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可侵蚀性受粒度特征影响, 当黏土和粉砂含量较高时, 会降低沉积物的可侵蚀性, 使其侵蚀速率降低。

(3) 潮流作用下, 曹妃甸甸头区域存在 1 个较为明显的流致剪应力高值区, 由甸头向外逐渐减小。潮流作用下甸头区域的粉砂站位及研究区中部的粉砂质砂站位部分时段会发生侵蚀。因此, 研究区表层沉积物侵蚀特征受到其自身可侵蚀性和潮流

作用的共同影响。

参考文献:

- [1] VAN RIJN L C. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 133(6): 649-667.
- [2] YAO P, SU M, WANG Z, et al. Erosion Behavior of sand - silt mixtures: revisiting the erosion threshold[J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(9): e2021WR031788.
- [3] HOUWING E J. Determination of the critical erosion threshold of cohesive sediments on intertidal mudflats along the Dutch Wadden Sea coast[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 49(4): 545-555.
- [4] LI Q, GRAY K E, JAISI D P. Relative roles of sediment transport and localized erosion on phosphorus load in the lower Susquehanna River and its mouth in the Chesapeake Bay, USA[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127(8): e2022JG006944.
- [5] 乔宇, 何青, 王宪业. 长江口表层沉积物起动试验研究 [J]. *泥沙研究*, 2021, 46(1): 34-41.
QIAO Y, HE Q, WANG X Y. Experimental study on critical shear stress of surface sediments in the Yangtze Estuary[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(1): 34-41.
- [6] AMOS C L, BERGAMASCO A, UMGIESSER G, et al. The stability of tidal flats in Venice Lagoon: the results of in-situ measurements using two benthic, annular flumes[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 51(1/4): 211-241.
- [7] NGUYEN H M, BRYAN K R, PILDITCH C A, et al. Influence of ambient temperature on erosion properties of exposed cohesive sediment from an intertidal mudflat[J]. *Geo-Marine Letters*, 2019, 39: 337-347.
- [8] WIBERG P L, LAW B A, WHEATCROFT R A, et al. Seasonal variations in erodibility and sediment transport potential in a mesotidal channel-flat complex, Willapa Bay, WA[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 60: S185-S197.
- [9] STEVENS A W, WHEATCROFT R A, WIBERG P L. Seabed properties and sediment erodibility along the western Adriatic margin, Italy[J]. *Continental Shelf Research*, 2007, 27(3/4): 400-416.
- [10] 陈思明, 王宪业, 孙健伟, 等. 粉砂淤泥质潮滩表层沉积物可侵蚀性研究 [J]. *泥沙研究*, 2020, 45(1): 45-51.
CHEN S M, WANG X Y, SUN J W, et al. Study on erodibility of surface sediment on silty mud tidal flat[J]. *Journal of Sediment Research*, 2020, 45(1): 45-51.
- [11] YANG Y, WANG Y P, GAO S, et al. Sediment resuspension in tidally dominated coastal environments: new insights into the threshold for initial movement[J]. *Ocean Dynamics*, 2016, 66(3): 401-417.
- [12] 林超然, 朱龙海, 胡日军, 等. 黏性沉积物可侵蚀性研究现状与展望 [J]. *海洋地质前沿*, 2023, 39(1): 1-17.

- LIN C R, ZHU L H, HU R J, et al. Status quo and prospect of research on erodibility of viscous sediments[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(1): 1-17.
- [13] 乔宇. 长江口表层沉积物侵蚀特性研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- QIAO Y. Erodibility of bed sediments in the Yangtze Estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2019
- [14] LIN C, BAO R, ZHU L, et al. Surface sediment erosion characteristics and influencing factors in the subaqueous delta of the abandoned Yellow River Estuary[J]. *Marine Geology*, 2024, 468: 107219.
- [15] 郭腾飞. 波浪与海流对沉积物再悬浮贡献的原位观测研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- GUO T F. The study of waves and currents contributing to sediment resuspension by in-situ observation[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014
- [16] SALIM S, PATTIARATCHI C, TINOCO R O, et al. Sediment resuspension due to near - bed turbulent effects: a deep sea case study on the northwest continental slope of western Australia[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(10): 7102-7119.
- [17] LAW B A, HILL P S, MILLIGAN T G, et al. Size sorting of fine-grained sediments during erosion: results from the western Gulf of Lions[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(15): 1935-1946.
- [18] 赵中豪, 孙健伟, 王宪业. 三大河口典型潮滩表层沉积物侵蚀特性分析 [J]. *泥沙研究*, 2021, 46(4): 68-74.
- ZHAO Z H, SUN J W, WANG X Y. Analysis of sediment erosion characteristics of typical tidal flats in three estuaries[J]. *Journal of Sediment Research*, 2021, 46(4): 68-74.
- [19] 张宁, 殷勇, 潘少明, 等. 渤海湾曹妃甸潮汐汊道系统的现代沉积作用 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(6): 25-34.
- ZHANG N, YIN Y, PAN S M, et al. Modern sedimentation of tidal inlet tidal basin system in Caofeidian coastal area, Bohai Bay, northeastern China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(6): 25-34.
- [20] 贾玉连, 柯贤坤, 许叶华, 等. 渤海湾曹妃甸沙坝-泻湖海岸沉积物搬运趋势 [J]. *海洋科学*, 1999(3): 56-60.
- JIA Y L, KE X K, XU Y H, et al. Sedimentary transport trends of within a sand bar/lagoon system in the Bohai Bay[J]. *Marine Science*, 1999(3): 56-60.
- [21] DONG H, JIA L, HE Z, et al. Application of parameters and paradigms of the erosion and deposition for cohesive sediment transport modelling in the Lingdingyang Estuary, China[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 94: 101999.
- [22] 李东, 侯西勇, 张华. 曹妃甸围填海工程对近海环境的影响综述 [J]. *海洋科学*, 2019, 43(2): 82-90.
- LI D, HOU X Y, ZHANG H. A review of the impacts of the Caofeidian reclamation project on the offshore environment[J]. *Marine Science*, 2019, 43(2): 82-90.
- [23] 方中华, 褚宏宪. 曹妃甸深槽斜坡稳定性影响因素敏感性分析 [J]. *海岸工程*, 2016, 35(3): 23-31.
- FANG Z H, CHU H X. Sensitivity analysis of the factors affecting slope stability in the Caofeidian deep groove[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 35(3): 23-31.
- [24] 祝贺, 孙志高, 衣华鹏, 等. 曹妃甸近岸表层沉积物粒度和粘土矿物分布特征研究 [J]. *地球与环境*, 2017, 45(3): 306-313.
- ZHU H, SUN Z G, YI H P, et al. Research on distribution characteristics of sediment grain size and clay mineral in Caofeidian inshore, China[J]. *Earth and Environment*, 2017, 45(3): 306-313.
- [25] 王文辉, 王相玉, 袁本坤. 曹妃甸邻近海域的海冰状况与特征 [J]. *海岸工程*, 2005, 24(3): 50-57.
- WANG W H, WANG X Y, YUAN B K. Conditions and characteristics of sea ice in the sea area adjacent to Caofeidian[J]. *Coastal Engineering*, 2005, 24(3): 50-57.
- [26] 闫新兴, 霍吉亮. 河北曹妃甸近海区地貌与沉积特征分析 [J]. *水道港口*, 2007, 28(3): 164-168.
- YAN X X, HUO J L. Analysis for characteristics of physiognomy and sediment in offshore area of Caofeidian, Hebei [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2007, 28(3): 164-168.
- [27] 吴澎, 姜俊杰. 曹妃甸港区选址研究 [J]. *水运工程*, 2011(9): 68-74.
- WU P, JIANG J J. Site selection of Caofeidian port area[J]. *Port Waterway Engineering*, 2011(9): 68-74.
- [28] XU K, CORBETT D R, WALSH J P, et al. Seabed erodibility variations on the Louisiana continental shelf before and after the 2011 Mississippi River flood[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 149: 283-293.
- [29] LO E L, BENTLEY S J, XU K. Experimental study of cohesive sediment consolidation and resuspension identifies approaches for coastal restoration: Lake Lery, Louisiana[J]. *Geo-Marine Letters*, 2014, 34: 499-509.
- [30] WENTWORTH C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377-392.
- [31] FOLK R L, W W C. A study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal Sedimentary Petrology*, 1957, 27: 3-27.
- [32] FOLK R L, ANDREWS P B, LEWIS D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand[J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [33] 费成鹏, 胡日军, 雒敏义, 等. 龙口水动力特征及其对人工岛群建设的响应 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 81-95.
- FEI C P, HU R J, LUO M Y, et al. Hydrodynamic characteristics of Longkou Bay and its response to artificial island groups[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 81-95.
- [34] ZHU L H, HU R J, ZHU H J, et al. Modeling studies of tidal dynamics and the associated responses to coastline changes in the Bohai Sea, China[J]. *Ocean Dynamics*, 2018, 68: 1625-1648.
- [35] SALEHI M, STROM K. Measurement of critical shear stress for mud mixtures in the San Jacinto estuary under different wave

- and current combinations[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 47: 78-92.
- [36] 宋敬泰. 黄河三角洲岸滩沉积物临界侵蚀剪应力研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- SONG J T. Study on sediment critical erosion stress on the tidal flat along the Yellow River Delta[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009.
- [37] 吕纪轩, 胡日军, 李毅, 等. 烟台北部近岸海域表层沉积物粒度分布及沉积动力环境特征 [J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(4): 27-36.
- LYV J X, HU R J, LI Y, et al. Grain size distribution pattern of surface sediments in the northern YanTai coastal waters and its bearing on hydrodynamic environment[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(4): 27-36.
- [38] 窦国仁. 再论泥沙起动流速 [J]. 泥沙研究. 1999, 24(6): 1-9.
- DOU G R. Re-discussion on sediment incipient velocity[J]. *Journal of Sediment Research*, 1999, 24(6): 1-9.
- [39] LEGOUT C, DROPO I G, COUTAZ J, et al. Assessment of erosion and settling properties of fine sediments stored in cobble bed rivers: the Arc and Isère alpine rivers before and after reservoir flushing[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(6): 1295-1309.
- [40] REID T, VANMENSEL D, DROPO I G, et al. The symbiotic relationship of sediment and biofilm dynamics at the sediment water interface of oil sands industrial tailings ponds[J]. *Water research*, 2016, 100: 337-347.
- [41] PATERSON D M, TOLHURST T J, KELLY J A, et al. Variations in sediment properties, Skeffling mudflat, Humber Estuary, UK[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1373-1396.
- [42] BALE A J, WIDDOWS J, HARRIS C B, et al. Measurements of the critical erosion threshold of surface sediments along the Tamar Estuary using a mini-annular flume[J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(10): 1206-1216.
- [43] 肖天葆. 数值模拟中海床临界冲刷切应力的计算方法 [J]. 水道港口, 2016, 37(3): 231-236.
- XIAO T B. Calculation method of seabed critical shear stress for erosion in numerica simulation[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2016, 37(3): 231-236.
- [44] 陆永军, 季荣耀, 左利钦. 曹妃甸深水大港滩槽稳定及工程效应研究 [J]. 水利水运工程学报. 2009(4): 33-46.
- LU Y J, JI R Y, ZUO L Q. Stability and engineering effect of shoals and channels in Caofeidian deepwater harbor area[J]. *Hydro Science and Engineering*, 2009(4): 33-46.
- [45] 褚宏宪, 史慧杰, 宗欣, 等. 渤海湾曹妃甸深槽海区地形地貌特征及控制因素 [J]. 海洋科学, 2016, 40(3): 128-137.
- CHU H X, SHI H J, ZONG X, et al. Characteristic geomorphology and controlling factors of Caofeidian Channel in the Bohai Bay[J]. *Marine Science*, 2016, 40(3): 128-137.
- [46] 孙丽艳, 孙钦帮, 张冲, 等. 曹妃甸围填海工程对海床冲淤的影响预测分析 [J]. 珠江水运. 2019(14): 73-76.
- SUN L Y, SUN Q B, ZHANG C, et al. Prediction and analysis of the influence of Caofeidian reclamation project on seabed erosion and deposition[J]. *Pearl River Water Transport*, 2019(14): 73-76.
- [47] 龚政, 葛冉, 冯骞, 等. 泥沙颗粒间黏结力作用及其对泥沙起动影响研究进展 [J]. 水科学进展, 2021, 32(5): 801-812.
- GONG Z, GE R, FENG Q, et al. Cohesive forces between sediment particles and its impact on incipient motion of sediment: a review[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(5): 801-812.

Study on erosion characteristics of surface sediments in southern Caofeidian

SI Tonghao¹, CHU Hongxian², SUN Feifei¹, BAI Dapeng^{2*}, ZHU Longhai^{1,3}, HU Rijun^{1,3}, LIN Chaoran¹

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China; 3 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The offshore area is a sensitive area of land-sea interaction. Due to the combined influence of natural and human activities, the sedimentary dynamic environment is more complex. The seabed surface is the key interface for the interaction between water and seabed, and the erosion characteristics of surface sediments are important factors affecting the evolution of seabed erosion and deposition. Based on the surface sediment samples of 91 stations and 10 undisturbed intubation samples in the southern sea area of Caofeidian in October 2021, the spatial distribution characteristics of critical erosion shear stress and erosion rate of surface sediments in the study area were analyzed by particle size experiment and indoor U-GEMS micro-erosion experiment. Combined with the numerical simulation results of tidal current, the erosion characteristics of surface sediments in the study area under the action of tidal current were discussed. The results show that the critical erosion shear stress of surface sediments in the area around the Caofeidian head is larger, and the critical erosion shear stress in the southern part of the study area is relatively small. The critical erosion shear stress of surface sediments is between 0.3 and 0.6 N/m². The erosion rate increases linearly with the increase of shear stress, and the maximum erosion rate is 0.059 g·m⁻²·s⁻¹. The erosion characteristics of surface sediments in the study area are affected by tidal current and the erodibility of surface sediments. The research results are helpful to enrich the theoretical research results of offshore erosion and deposition evolution from the aspects of sediment erosion characteristics, and have certain guiding significance for offshore engineering construction and coastal protection.

Key words: surface sediments; erosion characteristics; micro-erosion experiment; numerical simulation; Caofeidian