

张雨晨, 余建奎, 任宗海, 等. 入海泥沙减少对黄河三角洲潮滩粒度特征的影响——物理模型实验[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(6): 34-46.  
ZHANG Yuchen, YU Jiankui, REN Zonghai, et al. Influence of reduced sediment supply on the particle size distribution on tidal flats of the Yellow River Delta: a physical experimental study[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(6): 34-46.

# 入海泥沙减少对黄河三角洲潮滩粒度特征的影响

## ——物理模型实验

张雨晨, 余建奎, 任宗海, 王红艳, 许国纯, 战超, 王庆\*

(鲁东大学资源与环境工程学院海岸研究所)

**摘要:**为探究不同悬沙浓度下潮滩粒度特征的变化,对黄河三角洲潮滩进行了物理模拟实验。使用采自研究区的潮滩表层沉积物,设定与实际潮滩尺寸按比例缩小的室内水槽以及波浪潮汐动力模拟,对不同悬沙浓度条件(0~14.9 kg/m<sup>3</sup>)下的模拟“潮滩”进行粒度分析。结果表明,随着悬沙浓度的减少,潮滩粒度特征发生了明显变化。随着含沙量的减少,整个潮滩的细颗粒沉积物分布范围减小,总体上沉积物呈现粗化特征,但颗粒较大的极粗粉砂的分布同样减少;在不同含沙量条件下,分选系数、偏度和峰度均值总体呈现出潮下带上部高、潮间带和潮下带下部低的特征,反映了模拟的潮间带上部和潮下带前缘的分选较潮滩中部更好的特征。含沙量的变化同样影响了模拟潮滩的微地貌形态,随着含沙量的降低,潮滩微地貌逐渐侵蚀破碎。潮滩物理模型实验有助于快速再现潮滩冲淤形态和变化特征,使特定条件下潮滩的变化具备可预见性,从而为人类有针对性地进行生产活动提供参考。

**关键词:**粒度; 沉积动力; 沉积环境; 黄河三角洲

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.007

## 0 引言

粒度是沉积物最基本的表征,受物质来源、水动力、生物、地形地貌等多种因素的影响,同时沉积物粒度的变化也能体现沉积动力环境的演变过程。潮滩是海陆相互作用的重要地带,对于保护生物多样性、缓解风暴潮等极端天气带来的影响具有重要作用。潮滩受波浪、潮流和风等动力因素作用影响格外显著,对全球化、人类活动的响应也十分敏感<sup>[1]</sup>,因此,开展泥沙粒度特征研究对潮滩发育演化过程具有重要的指示意义<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2022-01-13

资助项目: NSFC-山东联合基金(U1706220); 国家自然科学基金(41901006); 山东省基金(ZR2019BD005); 山东高校青创科技团队(2020KJH002)

作者简介: 张雨晨(1997—),男,在读硕士,主要从事河口海岸环境方面的研究工作。E-mail: ld2019yczhang@126.com

\* 通讯作者: 王庆(1968—),男,博士,教授,主要从事河口海岸地貌方面的研究工作。E-mail: schingwang@126.com

黄河三角洲是典型的弱潮河口,加之黄河以多水多沙闻名,径流携沙量大,使得黄河三角洲成为少数仍在继续淤进的三角洲地区<sup>[3]</sup>。然而,根据水利部黄河水利委员会在利津对黄河输沙和径流的统计,自1950年以来,受水库建设、工农业用水等一系列人类活动的影响,黄河年输沙量和径流量均呈明显下降趋势<sup>[4]</sup>,其中2000—2017年平均输沙量为 $1.14 \times 10^3$  t,较近70 a来平均输沙量 $6.68 \times 10^3$  t下降82.93%;年径流量为 $150 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,较近70 a来平均径流量 $292.87 \times 10^8$  m<sup>3</sup>下降48.68%。黄河入海泥沙的减少改变了原有向海输送沉积物的特征,导致河槽萎缩,河床抬高,泥沙淤积速率减缓<sup>[5]</sup>。由于下游河道缺乏中上游泥沙的补给,下游河道受到持续冲刷的影响,细粒泥沙不断减少,粗粒泥沙占比越来越高,最终导致河床粗化和河口侵蚀<sup>[6-7]</sup>,黄河三角洲地区呈现出潮滩粗化现象。

前人主要在不同时间<sup>[8]</sup>、空间<sup>[9]</sup>尺度上开展了三角洲的冲淤变化和沉积物粒度特征变化研究,研究对象主要为海滩沙、风成沙<sup>[10]</sup>一类特征较为明显的沉积物组合。对潮滩系统的演变模拟研究一

般包括物理模拟和数学模拟 2 类。其中,数学模拟的研究成本较低,可控性强,而物理模拟则能够直观地反映潮滩的运动特征,较好地反映潮滩地貌的发育过程<sup>[11]</sup>。物理模型需要考虑几何相似条件和比尺效应,此前的物理模型实验多采用木屑等材料作为模型沙<sup>[12]</sup>,实验成本较高。目前,研究更多采用数学模型,然而物理实验通过对三角洲的沉积模拟,可追踪并分析不同实验条件下的沉积过程与沉积特征,能够比较立体直观地展现三角洲沉积体的特征。为探究入海泥沙减少对黄河三角洲沉积物粒度的影响,本文通过物理模型实验分析相同水动力条件下泥沙减少潮滩表层沉积物的粒度特征和变化趋势。

## 1 研究区概况

黄河三角洲(118°05′—119°10′ E 和 37°14′—38°10′ N)北起套尔河口,南至支脉沟口,现代黄河三角洲位于渤海以西,自 1855 年黄河重新汇入渤海以来,由于河道的频繁移动,大量沉积物快速沉积,形成了黄河三角洲。黄河三角洲属于典型的淤泥质潮滩,受泥沙和海洋水动力的影响淤进和蚀退交替频繁。波浪作用、潮汐作用、径流作用、风力作用和风暴潮等为黄河三角洲地貌沉积过程提供了动力条件。源自黄土高原泥沙(多为粉砂和黏土)为黄河三角洲的地貌演变提供了物质基础。但是,随着上游水土保持工作的开展,输入黄河三角洲的泥沙呈现出逐年减少的趋势<sup>[13]</sup>,黄河三角洲的淤进速度也趋于缓慢(图 1)。

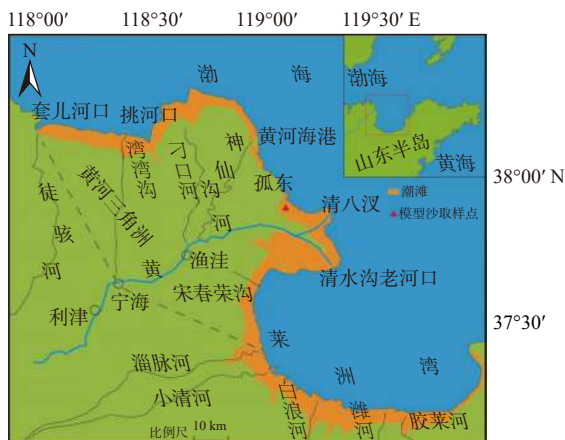


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

受季风气候影响,黄河三角洲春季以偏南风为主,偏北风减弱,夏季盛行偏南风,秋季多偏北风,

冬季盛行偏北风并伴随寒潮。多年平均风速约 4 m/s,最大风速可达 40 m/s。黄河三角洲位于半封闭的渤海中,且距渤海湾口较远,外海大浪较难进入,所以黄河三角洲附近海域以风浪为主,具有生长快、消失快的特征。黄河口两侧潮汐变化较为显著,口门北侧为不规则全日潮,半个月通常 10 天左右连续出现 1 次高潮和 1 次低潮<sup>[14-15]</sup>,其余则 1 天会出现 2 次高潮和低潮;口门南侧基本为不规则半日潮。黄河三角洲的潮汐状态以不规则的半日潮为主,河口区平均潮差为 0.6~0.8 m,莱州湾和渤海湾的平均潮差为 1.5~2.0 m。潮汐作用在由粉砂或黏土组成的黄河三角洲淤泥质海岸上影响最为明显,由于泥沙颗粒具有冲刷滞后效应和淤积滞后效应,被挟带到海岸的过程中因潮流流速减小,易发育成宽浅平坦的潮滩,岸滩宽阔,岸线平直,坡度较缓。

## 2 实验过程和样品处理

### 2.1 样品采集

本文采用黄河三角洲潮滩天然粉砂作为模型沙。为尽可能选择人类活动造成影响最小的自然岸滩,本着便于采样的目的,选择了位于孤东南侧(119.09°E, 37.84°N)的采样点。在退潮时段,在高潮滩中部和上部分别划定 2 个平行于岸线长 50 m、垂直于岸线宽 2 m 的带状样方,模型沙在样方内使用土壤铲取表层约 10 cm 的沉积物,放置水泥编织袋中,共计 400 袋(高潮滩中部约 300 袋,上部约 100 袋),总重量约 15 t。采集的泥沙用作对照实验使用,在不同含沙量条件下的 5 次对照实验中,作为模拟潮滩进行铺设。其中,高潮滩中部泥沙用作模型底沙,用于模拟宽阔平坦的潮滩<sup>[16]</sup>;上部泥沙用于模型悬沙,随波浪潮流向近岸传播。

黄河三角洲岸滩坡度极平缓<sup>[17]</sup>,远远 < 1/50,波浪的破碎与岸滩坡度无关,但需尽可能满足几何相似。在实验室中,使用坡度近乎平面,为模拟原型中较平缓的坡度,模型取剖面坡度为 1/35。在潮滩干湿转化地貌发育模型实验的基础上,使用刮板和抹子将地形整平(图 2)。

### 2.2 模拟实验

物理模拟是依照数值模型的参考数据对潮滩进行再现,并通过室内水槽和造波机对涌浪进行模

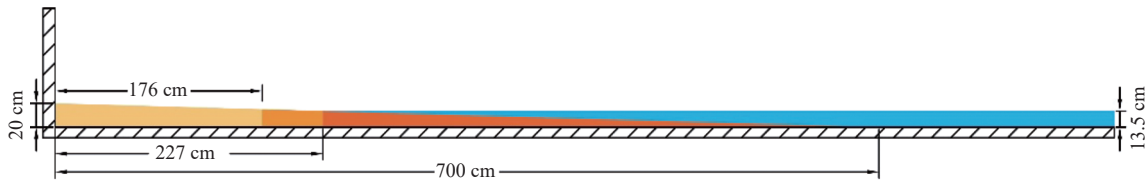


图2 潮滩铺设情况

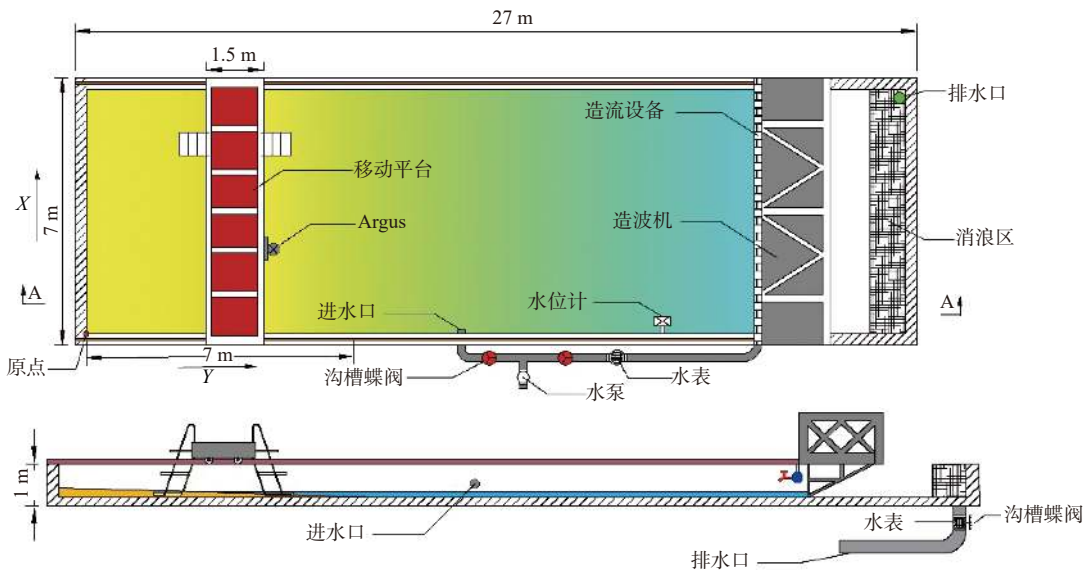
Fig.2 The tidal flat laying condition in the experiment

拟<sup>[18]</sup>, 从而对模型加以验证。本实验采用鲁东大学港口航道与海岸工程实验室中港池进行物理模拟实验。室内水槽总长 22 m、宽 7 m、深 1 m, 其中潮滩铺设试验区长 7 m、宽 7 m(图 3)。实验装置主要包括: 水沙均匀混合涨落潮装置、造波造流装置和平台取样装置等。在实验过程中, 将定量的泥沙与水投入水沙混合装置, 将水沙充分均匀混合, 实现浑水的精准配置。造波造流装置为实验提供波

浪和潮流水动力。造流装置通过连接扣固定连接的水管, 水管上平均分布设有并列组成的 53 个水龙头, 所有水龙头均有一定的角度倾斜, 目的是在水流喷出时有一定角度, 在港池内形成均匀水流, 配合造波机实现涨、落潮模拟。造波机采用天津理工大学设计的低惯性伺服电机分段平推式 RBM127 造波机, 能够产生不同频率、单向、规则和不规则的波浪。



(a) 室内水槽俯视图



(b) 水槽结构图

图3 室内实验现场

Fig.3 The setup of the physical simulation

根据《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》, 波浪潮流泥沙模型变率可取为 3~10, 实验所取模型

变率为 7.5, 即垂向比尺  $\lambda_h=100$ , 平面比尺  $\lambda_l=750$ 。模型预设静止水位为 13.5 cm, 潮差为 1.5 cm, 涨落

潮循环过程中, 水位从 13.5 cm 提高至 15 cm, 再降低至 13.5 cm。自实验水槽边缘铺设潮滩, 设置由边缘开始, 0~176 cm 为潮上带, 176~227 cm 为潮间带, 227~700 cm 为潮下带。为尽可能还原黄河三角洲岸滩较为平缓的坡度, 模型剖面取 1/35。流速设置范围为 0.3~14 cm/s。预设模型造波机波高 0.05 m, 波周期 0.8 s, 水深 0.135 m, 造波类型为有反射的规则波。

根据利津站 1950—2017 年水沙实测数据统计, 自 1984 年之后, 黄河输沙量锐减。2017 年输沙量  $0.08 \times 10^8$  t, 较 1984 年输沙量  $9.33 \times 10^8$  t 减少了 99.14%。为模拟黄河三角洲含沙量减少的情况, 本实验选取黄河改道至清水沟后, 年输沙量和年径流量均达到高值点的 1984 年, 以该年黄河口附近海域汛期悬沙浓度  $14.9 \text{ kg/m}^3$  为参照, 设立了 5 种不同的含沙量条件: 100%、65%、30%、15% 和 0%, 其中 100% 含沙量条件下的悬沙浓度为  $14.9 \text{ kg/m}^3$ , 其他含沙量则是按照比例改变悬沙浓度的配置。以近海含沙量的变化替代黄河入海泥沙减少的过程。实验过程中, 仅含沙量不同, 其他条件如水动力条件等均相同, 以此模拟潮流、潮汐和波浪共同作用下近岸海域含沙量减少对潮滩地貌冲淤影响的研究<sup>[19]</sup>(图 4)。在每轮涨落潮循环结束后, 对该含沙量条件下的潮滩进行取样。

### 2.3 粒度分析

于潮间带和潮下带设置 13×6 个样点(图 5), 并对采集的样品利用 Marvin Masterseizer3000 激光粒度分析仪进行粒度分析。首先, 向待测样品中加入  $\text{H}_2\text{O}_2$  加热, 后加入 10% 浓度盐酸以去除碳酸盐类物质和有机质, 然后注入蒸馏水静置 24 h, 以稀释样品中残留的 HCl 成分; 其次, 加入六偏磷酸钠溶液作为分散剂并置于超声波清洗器中震荡 3~5 min 使样品处于分散状态; 最后取适量样品利用粒度分析仪进行测量。粒度分析的测量精度为 0.01~2 000  $\mu\text{m}$ , 误差 < 2%。

粒度参数采用 Folk-Ward 公式<sup>[20]</sup>对平均粒径( $M_2$ )、分选系数( $\sigma$ )、偏度( $SK_1$ )和峰态( $K_g$ )进行计算, 沉积物的分类和命名采用 Folk 分类法。

地理空间插值是将离散点数据进行整合并实现可视化的有效手段<sup>[21]</sup>。本文通过 ArcGIS 软件中的克里金插值, 对得到的潮滩点位粒度参数进行空间插值, 目的是体现模拟过程中粒度数据在空间分布上的特征<sup>[22]</sup>。

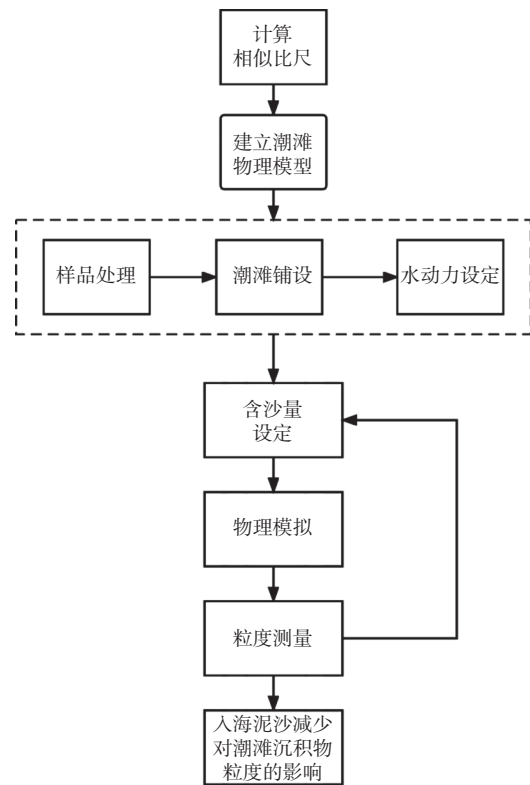


图 4 技术路线图

Fig.4 The technology roadmap

## 3 结果

### 3.1 粒度基本特征

根据测量结果, 不同含沙量条件下沉积物的主要粒级为粗粉砂, 平均含量 45.60%, 其次为中粉砂, 平均含量 27.01%; 再次为极细砂, 平均含量为 17.96%; 细粉砂、极细粉砂和黏土的平均含量分别为 3.86%、1.70% 和 1.64%; 极粗砂、粗砂、中砂和细砂的含量均不足 1%(表 1)。

总体上, 不同含沙量条件下的粒度分布较为集中, 主要为粗粉砂, 其次为中粉砂, 再次为极细砂; 几乎不含极粗砂、粗砂、中砂和细砂组分, 细粉砂、极细粉砂和黏土含量也较少。

由于模型沙采用了黄河三角洲潮滩的天然沙, 粒度分布较为集中, 变化幅度不大, 平均粒径( $M_2$ )变化范围为  $4.31\Phi \sim 5.18\Phi$ , 多为中粉砂和粗粉砂。随着含沙量的减少, 整体平均粒径逐渐变粗, 泥沙含量降低至 15%~0 时, 平均粒径减小且逐渐稳定。分选系数( $\sigma$ )介于 0.60~1.36, 以中等和较差为主, 整体分选程度中等。随着含沙量的减少, 总体分选程度逐渐变好, 但在清水条件下, 分选程度反而变

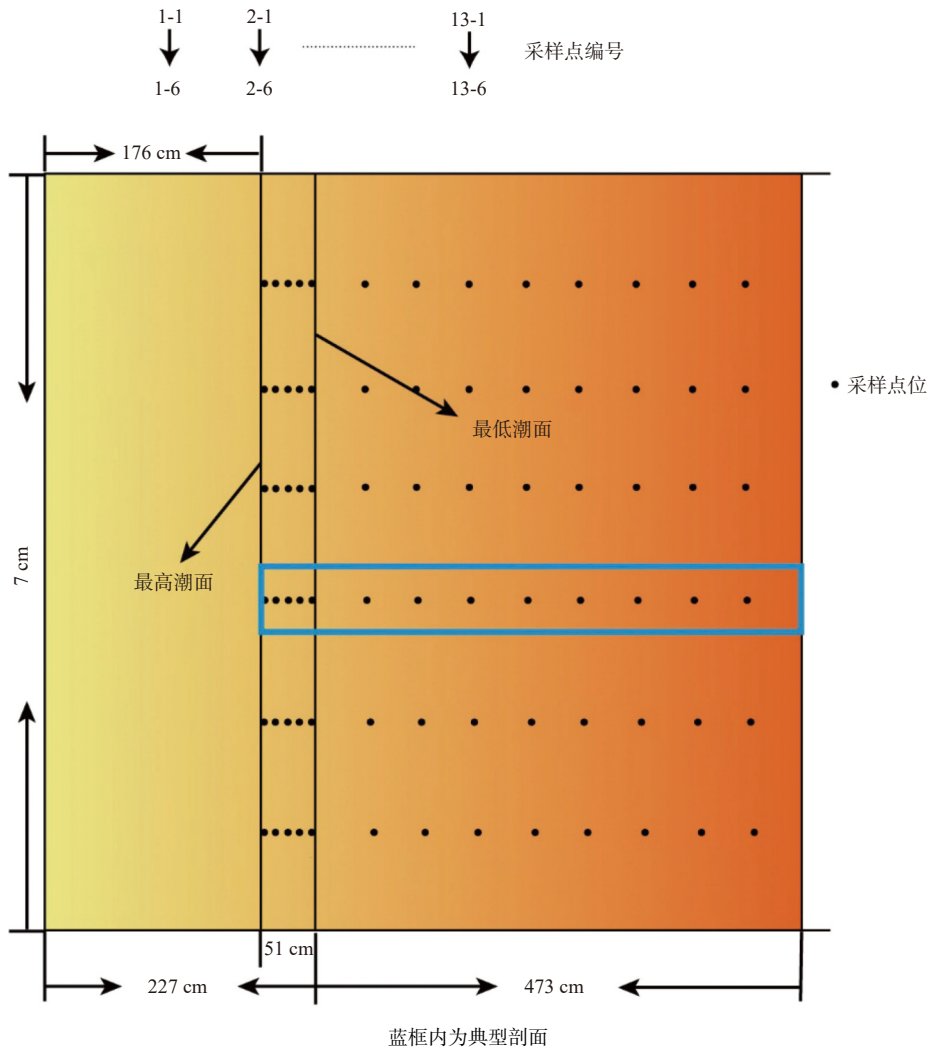


图5 采样点分布

Fig.5 The distribution of sampling points

表1 不同含沙量条件下沉积物的各粒级分布

Table 1 Distribution of sediment grain size under different sand content conditions

含沙量	极粗砂	粗砂	中砂	细砂	极细砂	粗粉砂	中粉砂	细粉砂	极细粉砂	黏土
100%含沙量	范围 0~5.4	范围 0~0.74	范围 0~0.46	范围 0~0.85	范围 11.45~28.14	范围 37.59~55.46	范围 14.96~34.59	范围 0.04~9.08	范围 0~3.37	范围 0.58~3.3
	均值 0.10	均值 0.05	均值 0.05	均值 0.30	均值 17.22	均值 43.70	均值 27.85	均值 4.82	均值 2.02	均值 2.06
65%含沙量	范围 0~3.97	范围 0~1.21	范围 0~2.86	范围 0~3.78	范围 8.16~24.85	范围 34.78~54.97	范围 18.57~39.07	范围 0.27~10.94	范围 0~2.60	范围 0.68~2.73
	均值 0.15	均值 0.05	均值 0.07	均值 0.33	均值 17.17	均值 46.18	均值 27.80	均值 3.71	均值 1.36	均值 1.61
30%含沙量	范围 0~1.05	范围 0~0.63	范围 0~0.54	范围 0~0.75	范围 10.7~27.48	范围 42.07~55.99	范围 16.61~33.72	范围 0.13~6.21	范围 0~2.53	范围 0.62~2.38
	均值 0.04	均值 0.04	均值 0.05	均值 0.21	均值 18.94	均值 47.61	均值 26.35	均值 3.05	均值 1.27	均值 1.22
15%含沙量	范围 0~3.81	范围 0~0.89	范围 0~2.68	范围 0~1.31	范围 8.51~25.91	范围 38.97~53.3	范围 20.28~35.06	范围 0.58~8.19	范围 0.92~2.98	范围 0.83~2.81
	均值 0.22	均值 0.09	均值 0.19	均值 0.36	均值 17.97	均值 44.91	均值 26.98	均值 4.14	均值 1.95	均值 1.63
0%含沙量	范围 0~1.82	范围 0~1.1	范围 0~2.2	范围 0~7.05	范围 10.45~30.6	范围 37.1~54.88	范围 12.98~32.88	范围 0~5.93	范围 0~2.6	范围 0.6~2.46
	均值 0.18	均值 0.12	均值 0.21	均值 0.60	均值 18.48	均值 45.62	均值 26.05	均值 3.59	均值 1.91	均值 1.67

差(表2)。沉积物偏度值在近对称、正偏到极正偏均有分布,多为正偏态,近对称偏态次之;随着含沙量减少,沉积物样品的偏态逐渐由正偏向近对称靠拢。不同含沙量条件下,样品中有自宽峰态至很窄峰态的不同沉积物分布,少有很宽和非常窄的峰态分布。随含沙量逐渐减少,峰态逐渐变宽,待含沙

量处于0%时,原本逐渐变宽的峰态反而变窄。

### 3.2 沉积物粒度特征的空间分布

#### 3.2.1 平均粒径的空间分布变化

总体上,随着悬沙浓度的减少,潮滩整体平均粒径逐渐减小,粗颗粒泥沙分布自潮下带向潮间带

表 2 不同含沙量条件下沉积物粒度参数

Table 2 Indicators of particle size distribution under different sand concentrations

含沙量		平均粒径/ $\Phi$	分选系数	偏度	峰态
100%	范围均值	4.46~5.08(4.76)	0.64~1.36(0.95)	0.05~0.44(0.20)	0.77~2.26(1.62)
65%	范围均值	4.45~5.18(4.75)	0.65~1.22(0.90)	-0.09~0.40(0.16)	0.66~2.54(1.50)
30%	范围均值	4.35~4.92(4.67)	0.60~1.23(0.87)	-0.10~0.31(0.15)	0.68~2.52(1.39)
15%	范围均值	4.33~5.02(4.72)	0.62~1.14(0.89)	0.08~0.30(0.23)	0.71~2.23(1.44)
0%	范围均值	4.31~4.84(4.68)	0.60~1.10(0.91)	0.00~0.30(0.17)	0.67~2.13(1.51)

转移, 而后再次向潮下带转移。在平均粒径高值点转移的过程中, 高值点分布的面积逐渐减少, 数值

逐渐减小。潮滩从淤积状态逐渐向侵蚀状态演变 (图 6)。

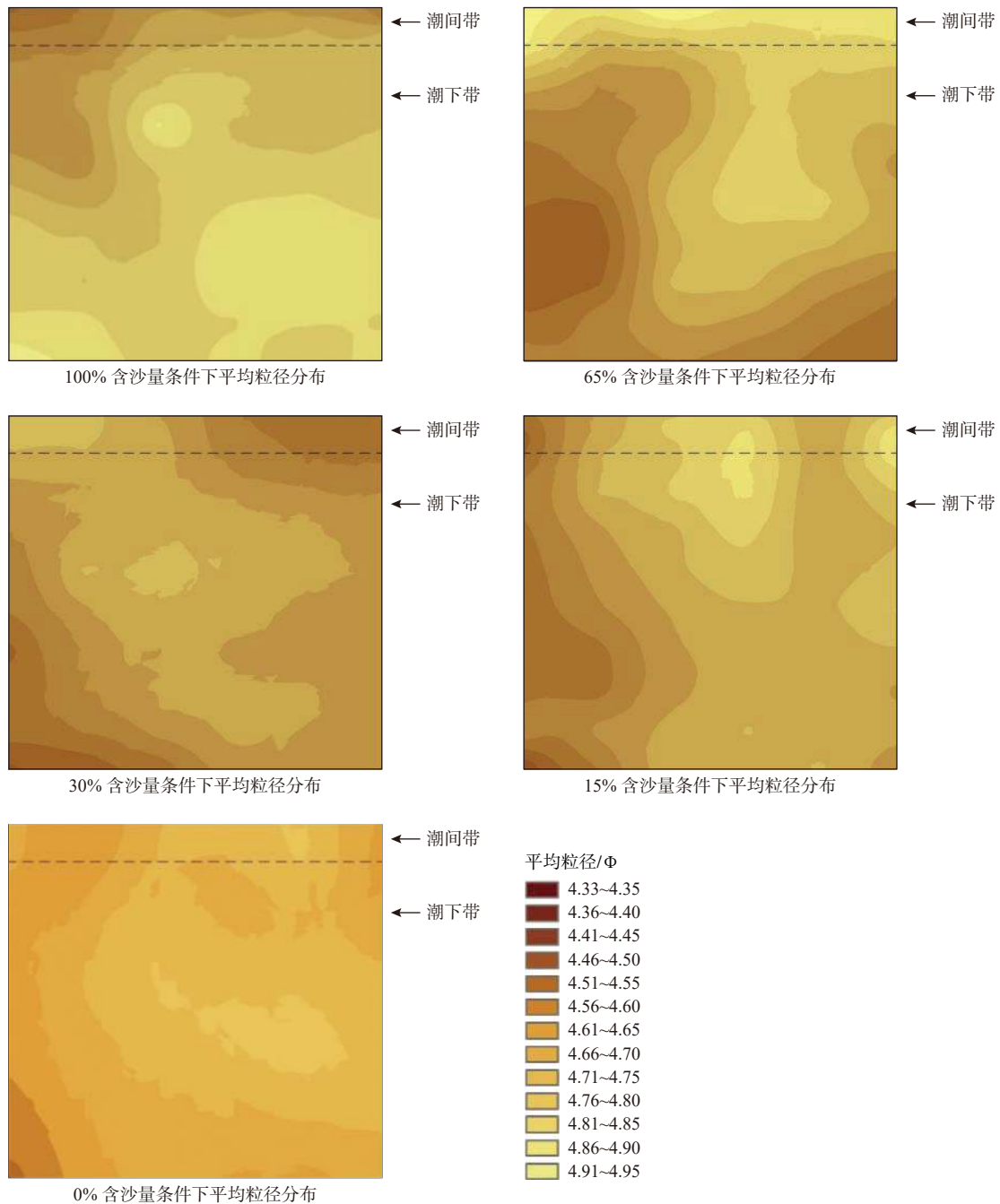


图 6 不同含沙量条件下平均粒径空间分布

Fig.6 Spatial distribution of average particle size under different sand concentrations

100%含沙量时,平均粒径自潮滩左上部向右下部逐渐减小。 $\Phi$ 值在水下岸坡中上部、左侧最前缘和水下岸坡右前位置存在3个高点。65%含沙量条件下,潮间带平均粒径整体较潮下带更细。潮下带水下岸坡两侧 $\phi$ 值较小,平均粒径较粗,水下岸坡中部偏右侧 $\Phi$ 值偏高,平均粒径较细,同一剖面上,平均粒径相差梯度较大。30%含沙量时,仅有潮间带左侧和潮下带中部 $\phi$ 值相对较大,沉积物颗粒较细,沉积物平均粒径自潮下带中部向周围逐渐变粗。15%含沙量时,潮间带下部的中间和左侧平均粒径较小,而潮滩左侧整体平均粒径较大。清水条件下,整个潮滩的 $\Phi$ 值增大,潮滩平均粒径整体上变粗,整个潮滩平均粒径的 $\Phi$ 值相差不大,粗颗粒泥沙被搬运至潮下带水下岸坡左下侧,平均粒径较粗部分范围较小。

在100%含沙量条件下,因为含沙量较大,波浪、潮流的挟沙能力有限,悬浮泥沙通量超过了水流挟沙能力,整个潮滩处于淤积状态。在退潮过程中,以潮间带中部为中心发生侵蚀,潮间带原有的细颗粒泥沙流失,导致该处平均粒径较潮下带更粗。而由于潮滩整体淤积,大量细颗粒泥沙在潮下带黏结,平均粒径相对较小。

65%含沙量时,潮滩冲淤并存。随着含沙量降低,泥沙通量下降,潮滩冲淤并存,水流挟带泥沙运动,该条件下,潮间带淤积较明显,细颗粒沉积物较为集中,而潮下带处于侵蚀状态,由潮下带中心向四周沉积物颗粒逐渐变粗。随着含沙量浓度的降低(含沙量为30%~0),潮滩冲淤平衡被打破,逐渐以侵蚀为主,缺少泥沙供应的潮滩,平均粒径值整体提高,潮滩沉积物颗粒整体上呈现变粗的趋势,细颗粒泥沙在潮滩的分布面积减少;同时,较为突出的粗颗粒沉积物也逐渐减少。

### 3.2.2 其他粒度参数的空间变化

各粒度参数在港池的分布特征有一定相似性,主要体现为,高点位置较吻合,整体均呈条带状分布。总体上反映潮间带和潮下带前缘分选相对较好,偏度、峰态值都相对较低,潮下带上部分选程度较差,偏度值和峰态值都较高(图7)。

100%含沙量情况下,在潮下带中上部有一高点,该处分选较差,偏度为正偏,峰态很窄;各粒度参数以该高点为中心向四周逐渐减小,分选逐渐变好。这与平均粒径的分布特征,潮滩的冲淤特征较为一致,潮间带上部平均粒径较粗,潮下带下部平均粒径较细,粒径分布两极分化较为明显,但分选相较于潮下带中部都更好,这在偏度分布上也

得以体现。

65%含沙量条件下,各粒度参数高点右移至潮下带上部右侧位置,与平均粒径高值区域分布较为一致,并呈带状分布,向潮间带与潮下带下部两侧方向分选程度逐渐变好,偏度值由正偏转向近对称,峰态由非常窄逐渐向中等峰态靠拢。这与平均粒径值自潮间带向潮下带呈条带状逐渐减小的特征较为吻合。

随着含沙量的降低(30%~0),潮下带上部分选较差部分面积逐渐扩大,但分选系数的值总体呈条带状向潮间带、潮下带逐渐减小,分选更好,逐渐覆盖整个剖面。各粒度参数自潮下带上部向潮间带方向和潮下带下部两侧方向逐渐降低,正偏范围逐渐向潮间带、潮下带前缘两侧扩大。

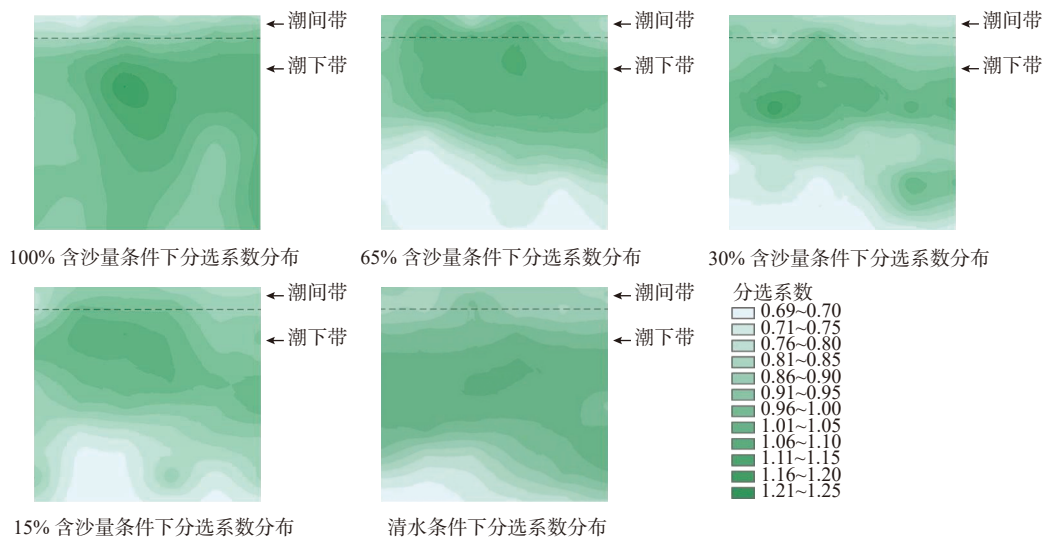
### 3.2.3 不同含沙量条件下沉积物粒度特征

为体现从潮间带上部至潮间带下部不同特征,本文从同一纵剖面上的点位数据取平均值,并取不同剖面进行对比。

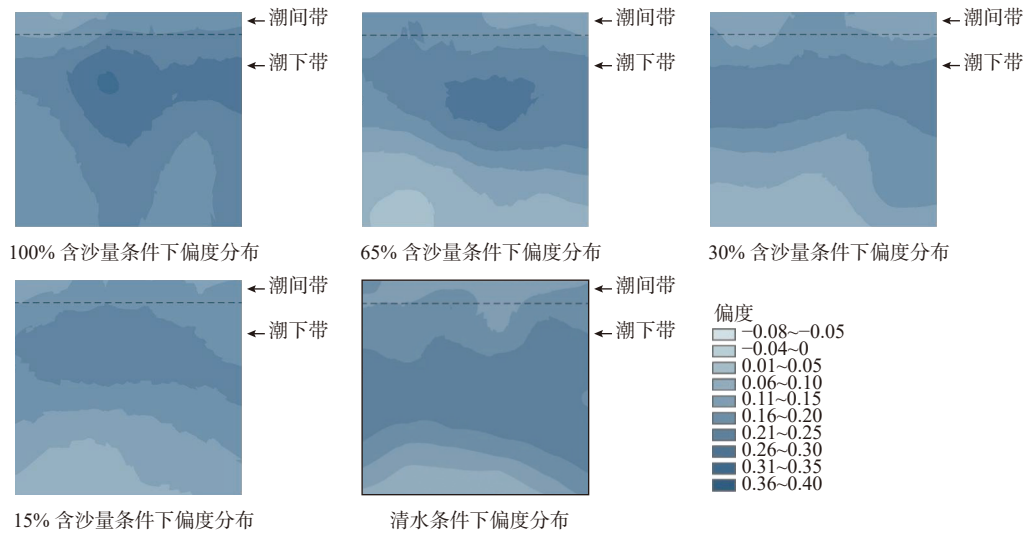
100%含沙量情况下,潮间带由于高程较大,受到的潮流冲刷作用较小,细颗粒物在潮间带堆积,由于潮流动力较弱,大量被潮流携带的泥沙在潮下带前沿沉降,导致该环境下由海向陆沉积物的平均粒径均值逐渐增大。随着含沙量的减少,泥沙通量逐渐小于水流的挟沙力,多余的挟沙力逐渐作用于潮滩表面,将潮滩表层的泥沙搬运至潮间带上部,使潮间带平均粒径均值增大,之后含沙量进一步减少,潮滩逐渐从淤积状态转变成冲淤平衡最后完全转变为侵蚀状态,整体平均粒径相对较小,呈现较好的单峰分布(图8)。

在不同含沙量情况下,不同剖面分选系数均介于0.6~1.4,分选适中,少部分分选较差,但6—8号样点的分选系数均高于其他样点,分选较差。所有样品偏度均值均为正偏,由陆向海呈现出先升高、后降低的趋势;偏度值同样在潮间带下部和潮下带上部偏度值整体较高,潮间带上部与潮下带下部偏度值均较低。频率曲线整体呈现出较好的单峰分布,在6—8号处 $K_g$ 值更高,峰态更窄,说明潮滩表层沉积物整体物源分布较为一致;而潮间带下部及潮下带上部受波浪和潮流冲刷作用影响,使该部分潮滩不断有更粗的沉积物沉降,导致偏度值增大,频率曲线上体现为正偏,同时分选变差。

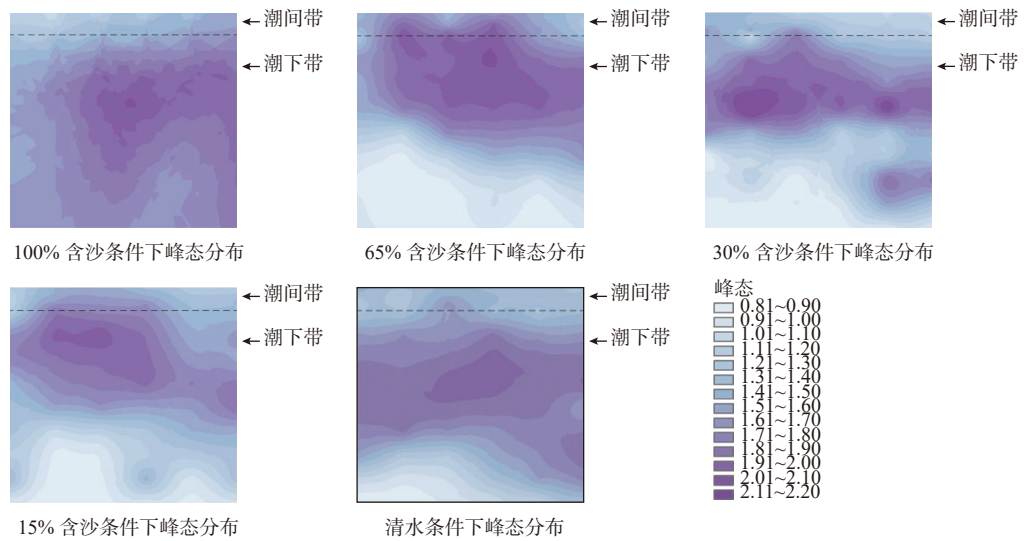
在清水条件下,因为缺少泥沙补给,潮滩整体体现出侵蚀趋势,原本潮滩表层沉积物被退潮流带走,粗颗粒被退潮流起后逐渐在潮间带下部和潮下带水下岸坡沉降,使得沉积物粗颗粒成分增加,



(a) 不同含沙量条件下分选系数空间分布



(b) 不同含沙量条件下偏度空间分布



(c) 不同含沙量条件下峰态空间分布

图 7 不同含沙量条件下粒度参数的分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of particle size parameters under different sand concentrations



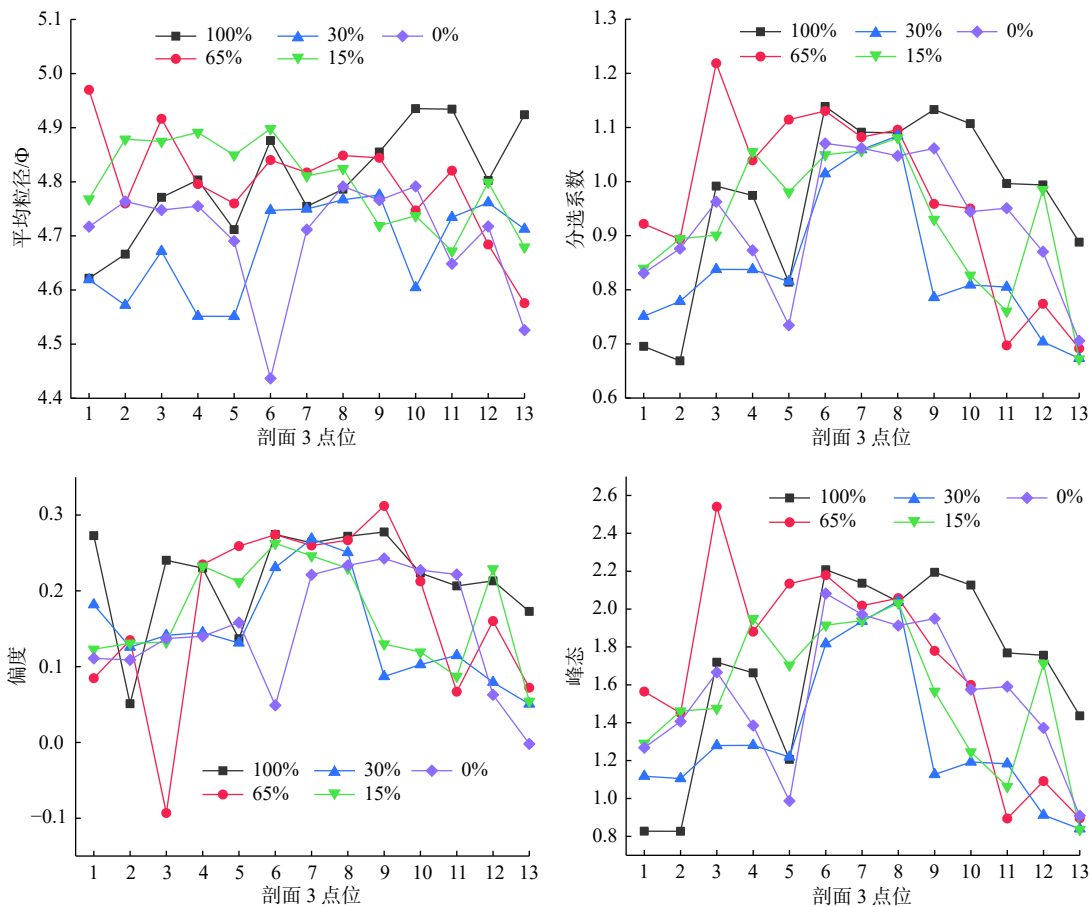


图 8 不同粒度特征在剖面 3 的变化

Fig.8 Variation of different particle size characteristics at profile 3

偏度值由陆向海逐渐增加,逐渐从近对称发展为正偏,在 13 号剖面偏度达到最大值。

### 3.3 同一剖面不同含沙量的粒度参数变化

为体现含沙量减少对潮间带和潮下带环境带来的改变,选取了不同浓度下特征最明显的潮滩 3 号点的粒度数据为参考,截取横剖面进行对比。

总体来看,不同悬沙浓度下粒径的特征有明显区别,平均粒径变化较复杂;分选系数则整体符合由陆向海数值先上升后下降的特征,反映出由潮间带上部至潮下带沉积物分选程度逐渐变差,自潮下带上部开始达到高值,而后分选程度逐渐变好的过程;偏度值整体表现为剖面两端偏度相对较低,多为近对称或正偏,剖面中部偏度值较高,大多为正偏;峰态值在剖面上的分布同样呈现出两端低、中间高的特征,潮下带上部峰态很窄,向潮间带一侧和潮下带下部一侧,峰态逐渐变宽(图 8)。

100% 含沙量条件下,平均粒径自潮间带向潮下带呈不断变小的趋势,与该剖面其他含沙量条件的平均粒径相比总体更细,这体现出高含沙量条件

下潮滩整体淤积,细颗粒沉积物在潮滩富集的情况;65% 含沙量时,平均粒径自潮间带向潮下带则不断增大,潮滩冲淤并存;30%、15% 和 0% 含沙量条件下,平均粒径在  $4.44\Phi\sim 4.90\Phi$  范围内波动,整体变化不大,这反映出低含沙量条件下,潮滩整体冲淤情况趋于一致。在潮间带上,65% 含沙量时平均粒径的变化最大,而低含沙量条件下(30%~0%)平均粒径的变化较小,说明该含沙量条件下剖面的潮间带处的沉积物分布较为平缓。在潮下带处,100% 含沙量时平均粒径数值自潮下带上部向下部逐渐增大,65%、15% 含沙量条件下,平均粒径先增后减,呈现出双峰特征;而 30% 与 0% 含沙量条件下,该剖面潮下带平均粒径变化幅度较大,不同位置冲淤情况不相同。平均粒径最低值出现在 0% 含沙量时,此时潮滩缺少泥沙补给,整体处于侵蚀状态,大颗粒沉积物被退潮流搬运,留下较细的泥沙颗粒。在潮间带中部,100%、65%、30% 和 0% 含沙量条件下分选系数均有不同程度的增加,而后在潮间带与潮下带的交界处均有不同程度的减少,说明在冲淤条件不同的情况下,潮间带处沉积物搬运较为频繁,

分选相对于其他位置更差。不同含沙量条件下的分选系数在剖面 6—8 号点处(即潮下带上部)的差异较小,受潮滩冲淤的影响不明显。

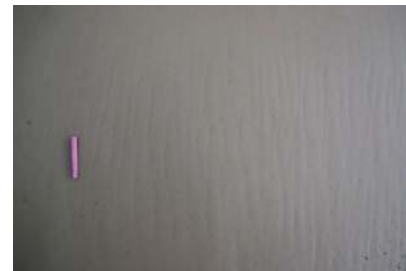
总体上看,不同含沙量条件下,该剖面潮间带上部沉积物颗粒粗细较为对称,少部分点位偏向细粒部分一侧;潮下带上部,沉积物整体偏向细粒部分一侧,细粒部分含量大于粗粒部分;在潮下带水下岸坡最前缘,除 100% 含沙量条件下沉积物多偏向细粒部分以外,其他含沙量条件下,粗细分布较为对称。

与分选系数在潮间带中部的分布特征一致,不同含沙量情况下的峰态值在剖面的 3 号点位处存在不同程度的增加,随后逐渐减小,在潮下带处再次增加,最后自潮下带中下部整体逐渐减小。100% 含沙量时峰态在潮间带时较其他含沙量时更宽,说明该处分选程度好于同位置其他条件;而在潮下带,100% 含沙量峰态则较其他条件更窄,表明该处原有的沉积环境混入了大量其他组分的沉积物,这些沉积物是高含沙量条件下被堆积在潮下带最前端的。65% 含沙量条件下,在潮间带处分选系数高于其他条件,较其它含沙量时分选程度更差,与 100% 含沙量时情况类似,同样是因为沉积物大量涌入潮间带导致峰态出现明显变化。

### 3.4 潮滩的冲淤形态特征

实验过程中,波、流耦合水动力条件基本不变,随着含沙量减少,对潮滩微地貌产生了一系列影响。总体来看,随着悬沙含量的下降,潮滩侵蚀程度逐渐加剧,潮滩原本平实的滩面逐步出现细微的变化,而后微地貌特征逐渐凸显。总体上,潮滩微地貌发育特征与不同含沙量情况下的粒度变化特征是相吻合的,体现为随着含沙量的减少,潮滩受冲刷的程度自潮上带向潮下带逐渐增强,潮滩微地貌的受侵蚀程度也逐渐的增强。在前人的研究中,泥沙供应量越大,则潮滩越平缓<sup>[23]</sup>。而本实验过程中,除了符合上述情况外,低悬沙浓度情况下,潮滩由部分淤积逐渐向全面受到侵蚀转变(图 9)。

100% 含沙量条件下,潮间滩涂由于高程较大,受波浪影响较小,退潮过程中,沉积物表层遭到水流侵蚀,出现垂直于岸线的流痕;在潮下带水下岸坡上部,水动力作用较潮间带处更强,水流达到泥沙起动流速,并带动泥沙在潮滩上形成沙丘<sup>[24]</sup>,在波浪的作用下形成规则的沙波;在潮下带下部则同时存在流痕与沙波,该处受波浪、潮流动力最为明



(a) 流痕



(b) 沙波



(c) 沙鳞

图 9 潮滩微地貌特征

Fig.9 Tidal beach micro-topographic features

显。65% 含沙量条件下,潮间带同样分布有流痕,但潮下带处分布的沙波相较于 100% 含沙量时更为平坦,这与含沙量减少,原本水动力条件不变的情况下,多余挟沙力导致潮滩表层沉积物重新悬浮,将原有的沙波填平。30% 含沙量时,潮间带的微地貌仍以垂直于岸线的流痕为主,潮下带沙波密度较 100%、65% 含沙量时密度更大,且出现侵蚀现象。15% 含沙量条件下,潮间带仍以流痕为主,潮下带上部分布有大量不规则沙波,而潮下带下部地形相对更为平坦。清水状态下,除潮间带仍为流痕状态,潮下带部分区域分布沙波外,潮下带侧边原本分布的沙波发育为沙鳞,这是因为清水条件下,水流冲刷强度增大,使原有的沙脊从平直向弯曲状态过渡,最终发育为沙鳞。

## 4 讨论

已有研究对现代黄河三角洲表层沉积物的粒

度特征进行了分析,对比本次模拟后的粒度数据后发现,模拟潮滩的中值粒径 $4.31\Phi\sim 5.18\Phi$ ,与实测结果的中值粒径 $3.49\Phi\sim 7.25\Phi$ 差异较大,但总体处于实测范围内;模拟实验所选用的模型沙,采自孤东附近,其中值粒径数值与该位置实测数据 $4\Phi\sim 5\Phi$ 吻合。另一方面,河口部分沉积物粗化较为明显,与模拟实验的结果相符。

沉积物粒度特征主要受物源和外部沉积环境影响,本实验过程中,潮、流等水动力条件固定不变,仅通过含沙量的变化来体现入海泥沙减少对潮滩粒度特征的影响。沉积物中出现数值过高或过低的峰态,说明原有的沉积环境分选情况良好,但是后续搬运至现有沉积环境中的沉积物组分与原有的差别较大,导致分选变差,沉积物峰态出现极端值。

悬沙浓度的降低带给潮滩的影响不仅包含了淤积向侵蚀的转变,还使潮滩的平均粒径值整体增大,细颗粒沉积物在潮滩的分布范围减少,反映了含沙量减少导致的潮滩粗化。同时,实验设置不同悬沙浓度时采用的水动力条件不变,说明该背景下引起潮滩沉积物粗化的原因只有悬浮泥沙减少。这与前人对黄河三角洲潮滩粗化原因多来自于入海泥沙减少的结论一致<sup>[2,6]</sup>。潮滩的粗化不仅体现在沉积物的粒径增加,还表现为泥含量的减少和黏泥比的减小。

由于入海泥沙减少,导致河口三角洲侵蚀后退或淤积减慢的情况广泛出现,同样的情况也发生在长江河口三角洲和珠江三角洲。在前人的研究中,入海泥沙与冲淤量存在负相关关系<sup>[25-26]</sup>,入海泥沙减少,沿岸海底侵蚀加剧,冲刷愈发明显,导致悬移泥沙的颗粒越粗,使得来自河岸侵蚀的细粒泥沙减少,从而使入海泥沙粒径变粗。

物理模拟实验对黄河三角洲潮滩演变的意义,在于能够以有限的空间、时间,快速地了解潮滩在特定条件下的变化情况,增强入海泥沙减少条件下对潮滩变化的可预见性。入海泥沙的减少会导致河口的淤积速率降低,甚至侵蚀后退,导致河口面积缩小;导致河口悬沙浓度降低,对河口生态造成一定的影响,从而进一步影响到人类在河口的生产活动等。未来一段时间,黄河三角洲潮滩仍将处于持续侵蚀的状态。

入海泥沙减少对黄河三角洲岸滩的管理起具有警示作用。入海泥沙减少导致潮滩粗化侵蚀,会引起严重的近海土地流失和海洋资源的损失。为

保证潮滩环境的稳定性,可采取一定的护滩促淤手段<sup>[27]</sup>,如在岸滩上加种怪柳等护岸植物等。

同时,本次物理模拟实验也存在许多不足,受实验条件影响实验次数有限,且因为实验设计较为简单,并未考虑潮滩形态与潮流流向的影响,并未考虑海水盐度对泥沙动力过程的影响等。未来工作中,会将潮滩几何形状、潮向和盐度等因素考虑在内。

## 5 结论

(1)由于模型实验过程中采用同一地点采集的天然沙,粒级组分较为集中。经过粒度分析,测得沉积物类型主要包括中粉砂和粗粉砂,其中粗粉砂占主导。

(2)物理模拟实验中沉积物各项粒度参数均值的分布特征,表现为随着含沙量的减少,整个潮滩的细颗粒沉积物分布范围减小,总体上沉积物变粗,体现出粗化的特征,但是沉积物中颗粒较大的极粗粉砂的分布同样减少。不同含沙量条件下,分选系数、偏度和峰度均值总体先增高后降低,反映了模拟潮滩潮间带上部和潮下带前缘分选情况较潮滩中部更好的特征。

(3)沉积物粒度参数在港池中的空间分布表现为,100%含沙量下,粗颗粒集中在潮下带前缘,65%含沙量情况下,粗颗粒沉积物则在潮间带上部淤积,随着含沙量逐渐下降,潮滩受到侵蚀,平均粒径高值点多在潮间带下部、潮下带上部呈条带状发育。分选系数、偏度和峰态的分布特征较为相似,以潮下带中上部为中心呈条带状分布,呈现出潮滩上下两端分选较好,中部分选较差的特征。

(4)随着含沙量的不断减少,潮滩地貌的冲淤变化差异较大。100%含沙量条件下,潮滩整体处于淤积状态,潮滩最前缘淤积最为严重;65%含沙量条件下,潮滩顶部淤积明显,但潮滩下部已经开始侵蚀;随着含沙量的降低,侵蚀范围逐渐扩大,其中颗粒较粗的部分呈条带状分布且在不断变化。

### 参考文献:

- [1] 张云峰,张振克,张华兵,等.长江口启东嘴潮滩沉积特征及对人类活动的响应[J].海洋湖沼通报,2021,43(3):62-69.
- [2] 王庆,王小鲁,李雪艳,等.黄河三角洲南部废弃三角洲潮间滩涂表层沉积粒度特征及其粗化现象[J].第四纪研究,2017,37(2):353-367.
- [3] 杨立建,马小川,贾建军,等.近百年来黄河改道及输沙量变化

- 对山东半岛泥质楔沉积物粒度特征的影响[J]. 海洋学报, 2020, 42(1): 78-89.
- [4] 戴仕宝, 杨世伦, 郜昂, 等. 近50年来中国主要河流入海泥沙变化[J]. 泥沙研究, 2007(2): 49-58.
- [5] 李贺, 黄翀, 张晨晨, 等. 1976年以来黄河三角洲海岸冲淤演变与入海水沙过程的关系[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 486-498.
- [6] 李松, 王厚杰, 张勇, 等. 黄河在调水调沙影响下的入海泥沙通量和粒度的变化趋势[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(7): 20-27.
- [7] 袁萍, 毕乃双, 吴晓, 等. 现代黄河三角洲表层沉积物的空间分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(2): 49-57.
- [8] MURALI R M, RESHMA K N, KUMAR S S, et al. Spatio-temporal coastal morphological changes of Godavari Delta region in the east coast of India. 2020, 95(sp1): 626-631.
- [9] 司月君, 李保生, 李志文, 等. 北部湾海岸现代风沙与海滩沙粒度特征对比[J]. 中国沙漠, 2020, 40(6): 43-52.
- [10] 唐丽, 董玉祥. 华南海岸现代风成沙与海滩沙的粒度特征差异[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 14-23.
- [11] 周曾, 陈雷, 林伟波, 等. 盐沼潮滩生物动力地貌演变研究进展[J]. 水科学进展, 2021, 32(3): 470-484.
- [12] 伊锋, 李雪艳, 许国纯, 等. 潮滩干湿转换的地貌发育物理模型及动力机制[J]. 海洋通报, 2020, 39(3): 372-380.
- [13] PENG J, CHEN S, DONG P. Temporal variation of sediment load in the Yellow River basin, China, and its impacts on the lower reaches and the river delta[J]. Catena, 2010, 83(2/3): 135-147.
- [14] 岳保静, 廖晶, 高茂生, 等. 山东半岛砂质海滩动力地貌演化特征[J]. 海洋科学, 2017, 41(4): 118-127.
- [15] HOITINK A J F, WANG Z B, VERMEULEN B, et al. Tidal controls on river delta morphology[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(7): 637-645.
- [16] 王爱军, 陈坚. 厦门吴冠海岸潮间带沉积物粒度特征及其沉积动力学涵义[J]. 热带海洋学报, 2006, 25(6): 28-32.
- [17] 周良勇, 李安龙, 龚淑云, 等. 黄河口附近海域表层悬浮体分布及粒度特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 33-38.
- [18] 伊锋. 黄河入海泥沙减少对潮滩地貌冲淤影响的物理模型研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2020.
- [19] 高抒. 潮滩沉积记录正演模拟初探[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 750-755.
- [20] FOLK P I, WARD W D. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- [21] FAJAR Y, SUWARSONO, TAUFIK M, et al. Analysis of the dynamics of coastal landform change based on the integration of remote sensing and GIS techniques: implications for tidal flooding impact in Pekalongan, central Java, Indonesia[J]. Quaestiones Geographicae, 2019, 38(3): 17-29.
- [22] 张海平, 周星星, 代文. 空间插值方法的适用性分析初探[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(6): 14-18, 105.
- [23] 张长宽, 黄婷婷, 陶建峰, 等. 江苏海岸潮滩剖面形态与动力泥沙响应关系[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(3): 245-251.
- [24] 王俊辉, 姜在兴, 张元福, 等. 三角洲沉积的物理模拟[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 758-764.
- [25] 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 51年来珠江流域输沙量的变化[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 545-554.
- [26] 陈静, 赵宝成, 战庆. 长江口水下三角洲北部百年沉积物粒度组成及其对水动力环境的响应[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 692-699.
- [27] 张我华, 蔡袁强, 吴昌灿. 岸滩侵蚀的环境工程观念[J]. 安全与环境学报, 2002, 2(3): 8-12.

## Influence of reduced sediment supply on the particle size distribution on tidal flats of the Yellow River Delta: a physical experimental study

ZHANG Yuchen, YU Jiankui, REN Zonghai, WANG Hongyan, XU Guochun, ZHAN Chao, WANG Qing\*

(Institute of Coastal Research, College of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** To explore the variation of grain size distribution in tidal flat under different suspended sediment concentrations, physical simulation experiments in flume were conducted for tidal flat of the Yellow River Delta. With the sediments (15 t) collected from the tidal flat surface in the field, an indoor flume was designed in a scaled-down size proportional to the real case, in which wave/tidal dynamic parameters were set, and the grain size distributions under different suspended sediment concentrations ( $0\sim 14.9\text{ kg/m}^3$ ) were measured and analyzed. Results show that the characteristics of grain size distribution of tidal flat changed obviously with the decrease of suspended sediment concentration. With the decrease of sediment concentration, the distribution range of fine-grained sediments in the whole “tidal flat” decreased in a general coarsening trend; however, that of very coarse particles also decreased. Under different sediment concentrations, the average sorting coefficient, skewness, and kurtosis were generally greater in the upper intertidal zone than those in the intertidal zone and the lower subtidal zone, reflecting better sorting in the upper intertidal zone and the frontal subtidal zone than in the middle tidal flat. In addition, with the decrease in sediment concentration, the micro-topography of the “tidal flat” was gradually eroded and broken. This physical model experiment of tidal flat is able to reproduce quickly the variation in topography of erosion and deposition under different sand supplies and parameters, with which any changes of tidal flat under specific conditions can be simulated for better prediction in real cases as a reference for safe operation of human activities in similar tidal flat areas.

**Key words:** grain size; sedimentary dynamics; sedimentary environment; Yellow River Delta