

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019032401

盐度影响沉积物抗侵蚀性的环形水槽试验研究

代馨楠¹, 贾永刚^{1,2}, 张少同¹, 张淑玉¹, 张皓清¹, 单红仙^{1,2}

1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100

2. 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 青岛 266100

摘要: 黄河口海域盐度变化受入海径流量、海洋动力条件及气候等影响, 时空变化显著。河口区盐度场的变化不仅会影响营养盐、污染物的运输, 还会改变入海泥沙的沉降及固结特性, 进一步影响沉积物的抗侵蚀性。为研究不同盐度环境对沉积物抗侵蚀性的影响, 选用黄河三角洲沉积物进行室内循环水槽试验, 模拟不同盐度条件下沉积物发生侵蚀再悬浮的过程。研究得出在本研究区盐度 0~36‰ 范围内, 黄河口细颗粒沉积物临界切应力值存在明显差异, 变化范围为 0.055 6~0.080 6 Pa。固结程度相同, 沉积物临界切应力随盐度的增加呈对数增长特征, 在盐度小于 9‰ 的条件下, 黄河口细颗粒沉积物抗侵蚀性受盐度环境变化的影响尤为明显; 固结程度不同, 随着固结时间的推移, 盐度环境的增加对沉积物临界切应力的促进作用减小。

关键词: 盐度; 细粒沉积物; 侵蚀; 临界切应力

中图分类号: P736.5

文献标识码: A

Influence of salinity on sediment erosion-resistance: evidence from annular flume studies

DAI Xinnan¹, JIA Yonggang^{1,2}, ZHANG Shaotong¹, ZHANG Shuyu¹, ZHANG Haoqing¹, SHAN Hongxian^{1,2}

1. Environmental Geotechnical Engineering Institute, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: The temporal and spatial change of salinity field in the Yellow River estuary is affected by runoff, ocean dynamics and climate. It influences not only the transportation of nutrients and pollutants, but also the deposition and consolidation of sediments, and so that the erosion-resistance of the sediments. In order to study the effect of salinity on the erosion-resistance of sediments, the sediments from the Yellow River estuary were used to carry out in-door annular flume experiments to simulate the process of sediment erosion and resuspension under different salinity conditions. The results show that the critical shear stress of fine sediments in the Yellow River estuary varies significantly in the salinity range of 0~36‰, and may be up to 0.055 6~0.080 6 Pa. Under same consolidation degree, the critical shear stress is logarithmically proportional to the increase in salinity, especially the salinity is less than 9‰. Under different consolidation degree, however, the effect of salinity on the critical shear stress of sediments decreases with the consolidation time.

Key words: salinity; fine-grained sediments; erosion; critical shear stress

河口地区是咸淡水交汇和相互作用的过渡地带, 下泄的淡水与上溯的咸水在此混合, 引起河口区域水体盐度的沿程变化^[1]。由于黄河水下三角洲地理位置特殊, 所处渤海是半封闭海区, 使得该海域盐度场的变化受黄河径流冲淡水与外海高盐度海水共同控制, 具有径流性、季节性和年变幅大 3 个基本特征^[2]。河口区盐度场的变化不仅会影响营养盐、污染物的运输和动植物的丰度^[3], 还会影响沉积物的沉降、固结、侵蚀再悬浮过程。

沉积物的侵蚀受矿物成分、有机质含量、生物活动、孔隙水和侵蚀流体的成分以及底床固结历史的影响, 随时空而变化^[4], 其中盐度条件对沉积物的抗侵蚀性有很大的影响^[5]。盐度环境的变化不仅会影响该海域海水的密度分布, 从而影响海水的黏滞性, 改变其侵蚀切应力, 而且还会影响沉积物的含盐量, 改变其自身性质, 从而影响到海泥沙的抗侵蚀性, 其中较高的含盐量使得沉积物具有较大的抗侵蚀性^[6]。描述沉积物抗侵蚀性常用的两个参数是

资助项目: 国家自然科学基金“黄河口海域盐度变化对入海泥沙沉降与固结及侵蚀过程影响研究”(41372287), “波致渗流对粉质土海床侵蚀影响的定量评价方法研究”(41807229), “基于现场原位观测的黄河水下三角洲海底滑坡启动过程与控制因素研究”(41877223)

作者简介: 代馨楠(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事河口沉积物动力响应方面的研究工作, E-mail: daixinnan0110@163.com

通讯作者: 单红仙(1965—), 女, 教授, 主要从事河口海岸带地质灾害的研究工作, E-mail: hongxian@ouc.edu.cn

收稿日期: 2019-03-24; **改回日期:** 2019-11-26. 蔡秋蓉编辑

侵蚀速率和临界切应力^[7]。国内外学者普遍认为随着盐度环境的增加, 沉积物侵蚀速率降低^[8-10], 甚至可能降为淡水环境下的 1/5^[5]。而对于临界切应力而言, 由于黏性沉积物临界侵蚀状态的判断较为复杂^[11], 不同学者对此有不同看法。Parchure T M 认为盐度环境增加会提高沉积物的临界切应力, 增加其抗侵蚀性, 且在盐度较小时(小于 10‰)这种影响更加明显^[6]。单红仙^[12], 熊传芳^[13]等认为细粒沉积物的临界切应力值与盐度变化呈线性相关, 当水体盐度增加 1‰, 沉积物的临界切应力值增加 0.02 Pa^[14]。与此同时, 也有学者认为盐度环境与沉积物临界切应力呈弱相关性, 盐度环境的改变并不能影响沉积物的临界切应力^[10]。以上, 对于沉积物临界切应力的研究主要是利用黏结力仪(CSM)^[15]或者原位水槽试验^[16-17]进行现场测定, 由于沉积物本身性质不一, 且沉积物临界切应力的测定容易受到其含水率、平均粒径、剪切强度等物理力学性质的影响^[14], 所得结论各不相同。针对于此, 本文采用黄河口附近沉积物作为底床材料进行了室内环形水槽试验, 模拟不同盐度环境下沉积物侵蚀再悬浮过程, 给出了不同盐度条件下沉积物的临界切应力, 定量评估了盐度环境对沉积物抗侵蚀性的影响程度, 为更好的理解细颗粒沉积物动力特性提供了可靠的参考依据。

1 研究区概况

本研究区选自黄河水下三角洲近岸海域(37.4°N~38.4°N, 118.8°E~120.3°E)。由于渤海湾为半封闭海湾, 该海域潮汐主要是受大洋潮汐胁迫

振动, 大部分岸段为不正规半日潮, 平均潮差为 0.73~1.77 m; 波浪以风浪为主, 全年最强的风向为东北向, 平均风速 6.8 m/s, 最大风速可达 20.9 m/s, 极易形成风暴潮^[18]。由于黄河水下三角洲广泛存在着欠固结沉积物, 表层沉积物固结时间较短, 容易在水动力作用下发生侵蚀破坏^[19]。

本研究搭载中国海洋大学“东方红 2 号”科研考察船所开展的 2017 年夏季国家自然科学基金委共享航次, 利用温盐深仪(CTD)获得黄河水下三角洲各个站位底层盐度值, 并绘制该海域盐度分布图(图 1)。黄河入海后低盐度的冲淡水只局限于河口区, 整体沿海岸朝向南延伸, 并在渤海湾南部形成低盐度堆积区, 盐度约为 29‰。随着潮流的携带作用, 低盐度冲淡水向北最远可扩散至 38°1′N 一带, 向西边界被限制在 119°7′E 以东, 渤海中部与北部容易形成高盐度堆积区, 整个海域盐度为 29‰~33‰。由于该航次站位选取的局限性, 故无法观测到黄河入海口附近盐度分布。根据多年实测资料统计, 黄河水下三角洲海域盐度变化范围约为 3.4‰~35‰^[20], 盐度为 3‰~9‰低盐度冲淡水只局限于黄河入海口附近。通过黄河水下三角洲盐度场及沉积物固结状态的调查, 为室内试验参数的设定提供参考。

2 试验仪器与方法

2.1 试验仪器

本次试验是在中国海洋大学自主研发的环形

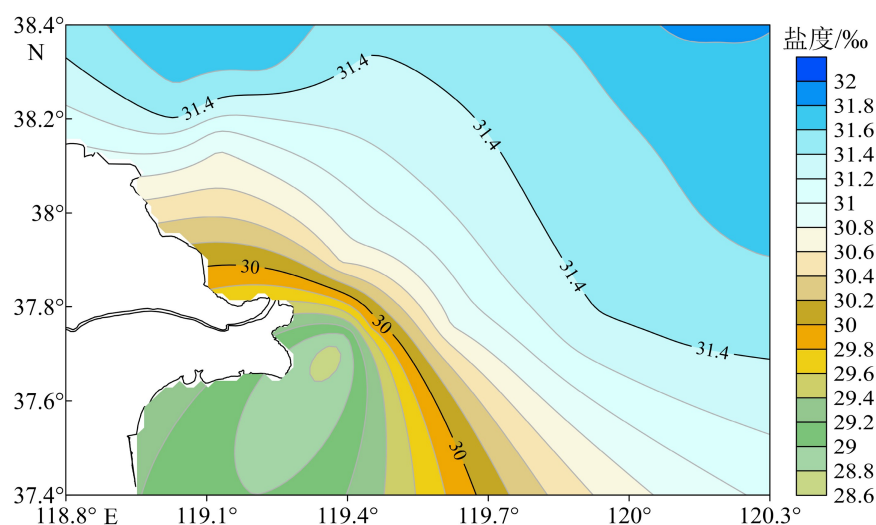


图 1 黄河水下三角洲底层盐度场分布 (2017.07)

Fig.1 Distribution of bottom salinity field in the Yellow River Delta (2017.07)

水槽中进行的,如图2所示。环形水槽长1.8 m,宽1.1 m,其冲刷系统由水流通道和土槽两部分组成。水流通道宽0.3 m,高0.2 m;土槽位于水流路径末端,长0.4 m,宽0.3 m,高0.3 m。通过发动机驱动桨叶旋转可以模拟5级递增的流速(0~0.29 m/s)。流速通过便携式流速计进行测量,将其光纤传感器固定在水流通道中央,测量床面正上方的流速剖面,进而估算逐级流速对应的近底切应力。浊度计的

OBS探头被固定在床面正上方9 cm处,位于土槽右侧,记录水体浊度变化。浊度数据通过标定公式转换为悬浮泥沙浓度。除此之外,在土床内部距表面10 cm处埋置一个精度为0.01 Pa的孔压传感器,以1 Hz的频率进行采集,试验后根据标定公式将电压值转换为孔压值,进而推测土床固结程度,得到沉积物孔压消散曲线,如图3。

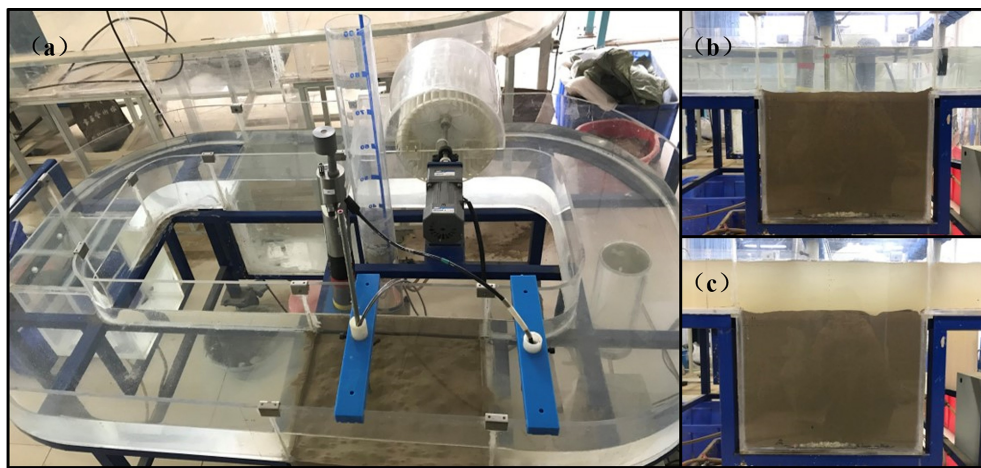


图2 环形水槽(a)及水槽试验系统(b)土槽侧视图,冲刷过程产生凹坑(c)

Fig.2 The annular flume (a) flume experimental system (b) soil flume side view pits and produced in erosion (c)

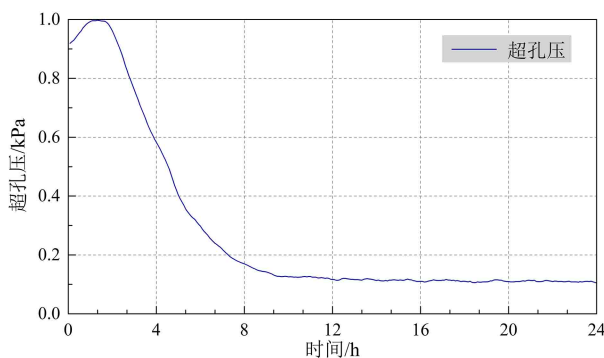


图3 沉积物超孔隙水压力的消散曲线

Fig.3 Dissipation curve of sediment pore water pressure

2.2 试验方法

本次试验所用沉积物取自现代黄河三角洲东部新滩叶瓣。通过密度计法测得沉积物粒径分布,其中细砂(29.29%),粉砂(64.87%)和黏土(5.52%)组成,中值粒径为0.044 mm,属于砂质粉土。根据黄河水下三角洲海域盐度变化范围,确定环形水槽试验所配置水体的盐度梯度为0、4‰、9‰、18‰、27‰、36‰;根据前期固结试验得到不同固结时间下的不同固结程度的土床,为研究不同固结程度下盐度变化对沉积物抗侵蚀性影响,故确定环形水槽

试验所配置土体固结时间为5 h、24 h,表征欠固结与完全固结状态沉积物。

首先将所取得沉积物风干,以1:3.3的水土比与不同盐度梯度(0、4‰、9‰、18‰、27‰、36‰)的水混合,制备含水率为30%的均匀土床,土床约为30 cm。然后向环形水槽中加入与配置土床相同盐度的水体至10 cm深度,开始进行不同时间的静水固结(5 h、24 h)。达到预期的固结时间后,开始冲刷试验,每一级流速持续冲刷15 min,共5级,观察水体悬浮泥沙的变化,如此重复进行10轮试验。模拟在不同盐度环境下沉积物固结并发生侵蚀的过程。每一轮试验过程中持续记录水槽中的悬沙浓度演变,同时测量距底1.5 cm处的流速。

3 试验结果与分析

3.1 孔隙水压力

在正式的冲刷试验之前,预先开展了沉积物固结试验,确定沉积物的固结状态。如图3所示,回填后的泥浆,仅在前8 h内经历了显著的孔压消散过程,距土床10 cm处的超孔压从1 kPa下降到0.15 kPa,

随后保持不变。

超孔压表征海床固结程度的关键指标, 可以通过计算得到。 $p_{ex}=p_{tot}-p_{sta}$ 。其中, p_{ex} 为超孔压, p_{tot} 为实测总孔压, p_{sta} 为上覆静水压。

即, 仅在前 9 h 内, 沉积物就已经完成了排水固结的过程, 这与在黄河口观测到的沉积物展现的快速固结过程一致^[21]。在此固结过程中, 土槽中的沉积物快速压缩排水, 超孔压迅速降低, 土床变密实。

3.2 近底切应力

盐度环境的变化会改变水体的密度, 进而影响其施加在土床表面的近底切应力。本文是通过测定水流流速, 计算摩阻流速, 然后根据摩阻流速计算施加在土床上的近底切应力。本试验所使用的便携式流速计测得最靠近底床的距离为 1.5 cm, 故采用距底 1.5 cm 处的实测流速来估计近底切应力。环形水槽发动机的 1 档、2 档、3 档、4 档、5 档分别对应实测流速为 0.16、0.21、0.22、0.28、0.29 m/s。由于便携式流速计的精度为 0.01 m/s, 第 2 档与第 3 档、第 4 档与第 5 档实测流速之间变化很小, 故将五档流速分为 3 个阶段。阶段 I 为第 1 档, 实测流速为 0.16 m/s; 阶段 II 为第 2、3 档, 实测流速为 0.21~0.22 m/s, 阶段 III 为第 4、5 档, 实测流速为 0.28~0.29 m/s, 由此得到不同盐度环境下近底切应力值见表 1。

黄河三角洲大部分海岸为潮控海岸^[22], 其侵蚀再悬浮主要受控于摩阻流速与海床沉积物颗粒之间的摩擦^[23]。对于光滑平坦海床, 可利用冯卡曼—普兰特方程将实测点的流速转换为摩阻流速 u_* :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

(1)

其中, u_* 是摩阻流速; u 是距海底 $z=0.015$ m 处的实测流速, m/s; $k=0.4$ 是卡曼常数; z_0 是床面粗糙长度, 取决于海床性质, 本试验中的粉质土海床相对平坦, $z_0=0.75$ mm^[24]。

根据水力学公式, 得到近底切应(τ_b):

$$\tau_b = C_D \rho_w u_*^2$$

(2)

其中, ρ_w 是水体密度; 不同盐度环境下水体密度不同; C_D 是摩阻系数, 约为 0.02。

由于水体盐度的变化, 导致其密度存在差异, 水体盐度越高, 密度相应增大。所以尽管每轮试验水体流速变化相同, 但由于水体密度的差异, 使得不同盐度水体施加在土床上近底切应力各有不同, 高盐度环境下水体所施加的近底切应力大于低盐度环境。

表 1 不同盐度环境近底切应力分布

Table 1 Near-bottom shear stress distribution under different salinity conditions

阶段	档位	流速/(m·s ⁻¹)	盐度/‰	水体密度/(g·cm ⁻³)	切应力/Pa
I	1	0.16	0	1.000	0.029 2
			4	1.003	0.029 3
			9	1.007	0.029 4
			18	1.014	0.029 6
			27	1.021	0.029 8
			36	1.028	0.030 0
II	2	0.21	0	1.000	0.050 3
			4	1.003	0.050 3
			9	1.007	0.050 6
			18	1.014	0.050 9
			27	1.021	0.051 3
			36	1.028	0.051 6
	3	0.22	0	1.000	0.055 2
			4	1.003	0.055 3
			9	1.007	0.055 5
			18	1.014	0.055 9
			27	1.021	0.056 3
			36	1.028	0.056 7
III	4	0.28	0	1.000	0.089 4
			4	1.003	0.089 8
			9	1.007	0.090 6
			18	1.014	0.091 2
			27	1.021	0.091 5
			36	1.028	0.091 8
	5	0.29	0	1.000	0.095 9
			4	1.003	0.096 2
			9	1.007	0.096 5
			18	1.014	0.097 1
			27	1.021	0.097 8
			36	1.028	0.098 5

3.3 不同盐度环境下悬浮泥沙浓度演变

3.3.1 固结 5 h

通过 3 个阶段冲刷试验, 得到了固结 5 h 沉积物不同盐度条件下冲刷时水体悬浮泥沙浓度随近底切应力的时间演变(图 4), 可以发现, 随着近底切

应力的增加,水体中悬沙浓度也经历了从 0.032 g/L 到 1.424 g/L 的逐级增长。每一级切应力持续作用 15 min,在各级切应力作用下,低盐度条件下的悬浮泥沙浓度普遍高于高盐度条件的悬沙浓度。

土床静水固结 5 h 后开始进行冲刷试验(图 2b),其中淡水条件下的初始悬沙浓度为 0.032 g/L,明显高于咸水环境,并且当开始冲刷之后,淡水环境中悬沙浓度迅速增加至约 0.116 g/L,依旧高于咸水环境。在前两阶段切应力作用下,悬浮泥沙浓度随着作用时间缓慢增加,然而当流速超过某一阈值之后,水体悬沙浓度突增,且在该流速持续作用下显著增加,水体迅速变浑浊。在第Ⅲ阶段近底切应力作用下,淡水条件下悬浮泥沙浓度增长剧烈,从初始的 0.291 g/L 增加到 1.039 g/L,是本级初始悬浮泥沙浓度的 3.6 倍。随着作用时间的推移,咸水环境中的悬浮泥沙增量减缓慢,甚至有所下降,这是由于水体流速不稳定,使得一部分沉积物发生沉淀,而在此流速下新侵蚀的量小于沉降量,则会使得水

体中悬浮泥沙浓度降低。与此同时,淡水环境中的悬浮泥沙浓度持续升高,主要是由于在近底切应力为 0.027 Pa 作用 7 min 时,土床表面产生凹坑(如图 2c)。随着近底切应力的持续作用,凹坑周围的沉积物冲起,进一步向下向右进行扩展。但由于被冲起的大颗粒沉积物不足以被水流携带运输到更远的地方,故在凹坑的下游沉降,产生略高于土床表面的堆积区,该区沉积物的粒径明显大于土床表面,且水体中悬浮泥沙浓度持续增加。在第Ⅲ级切应力作用下,由于凹坑的产生,淡水环境中悬浮泥沙浓度明显高于含盐水体。

3.3.2 固结 24 h

通过重复 3 个阶段的冲刷试验,得到了固结 24 h 沉积物不同盐度条件下冲刷时水体悬浮泥沙浓度随近底切应力的时间演变(图 5)。

土床静水固结 24 h 后开始进行冲刷试验,水体中初始悬浮泥沙浓度极低,约为 0.003 g/L,明显小于固结 5 h 时水体的初始悬沙浓度。在此情况下,

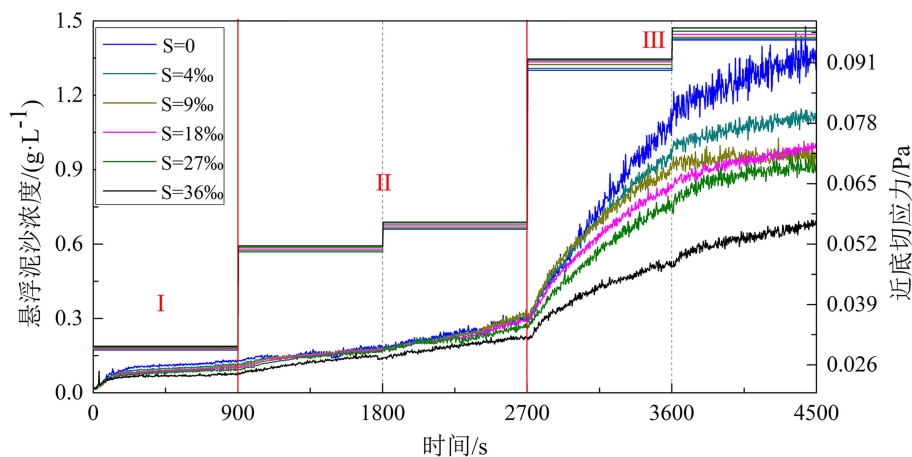


图 4 不同盐度条件下悬浮泥沙浓度随近底切应力的时间演变图 (5 h)

Fig.4 Time series of the SSCs and applied near-bed shear stresses under different salinity conditions (5 h)

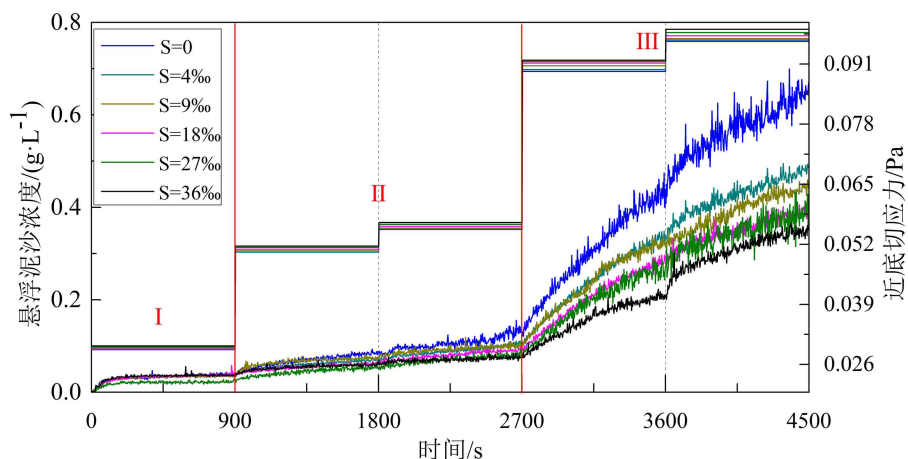


图 5 不同盐度条件下悬浮泥沙浓度随近底切应力的时间演变图 (24 h)

Fig.5 Time series of the SSCs and applied near-bed shear stresses under different salinity conditions (24 h)

不同盐度水体中的初始悬沙浓度差别不大,即水体中的悬浮泥沙在 24 h 内已完全沉降。在前两阶段切应力作用下,水体始终较为澄清,悬浮泥沙浓度随着作用时间缓慢增加,总悬沙浓度增长量不超过 0.124 g/L,明显低于固结 5 h 的悬沙浓度增量,土床强度较高。在第Ⅲ阶段近底切应力作用下,当流速超过某一阈值之后,悬浮泥沙浓度突增,在此近底切应力作用下,淡水环境中的悬浮泥沙浓度突增为 0.411 g/L,是本级初始悬浮泥沙浓度的 3.4 倍,土床被侵蚀。水体中悬浮泥沙浓度随着近底切应力作用时间持续增加,淡水环境中的悬沙浓度明显高于含盐水体,且盐度越大,水体中的悬浮泥沙浓度越小。固结 24 h 沉积物在开展冲刷试验后,悬沙浓度也经历了从 0.003 g/L 到 0.622 g/L 的逐级增长,明显小于固结 5 h 的悬沙浓度变化,可以看出随着固结时间的增加,沉积物侵蚀量减小,抗侵蚀性增加。

3.4 不同盐度环境下临界切应力变化

冲刷试验过程中,根据每一级水流近底切应力与悬浮泥沙的关系,可以得到沉积物临界切应力。本文采用线性回归法来定义临界切应力,即利用悬浮泥沙浓度和切应力进行线性回归,将回归线与悬浮泥沙浓度变化量始终大于 0.01 g/L 时的初始浓度的直线的交点定义为临界侵蚀切应力^[4, 11, 19]。

3.4.1 固结 5 h

土床固结 5 h 的各组近底切应力与最大浊度之间的关系如图 6, 尽管各组水槽试验水体盐度不同,导致所施加的近底切应力不同,但是对于任意一轮试验,水体的近底切应力都与每一级切应力作用下的最大悬沙浓度呈正相关关系,相关系数 R 为 0.91~0.98。

根据以上方法,得到不同盐度环境下固结 5 h 沉积物的临界侵蚀切应力,如表 2。

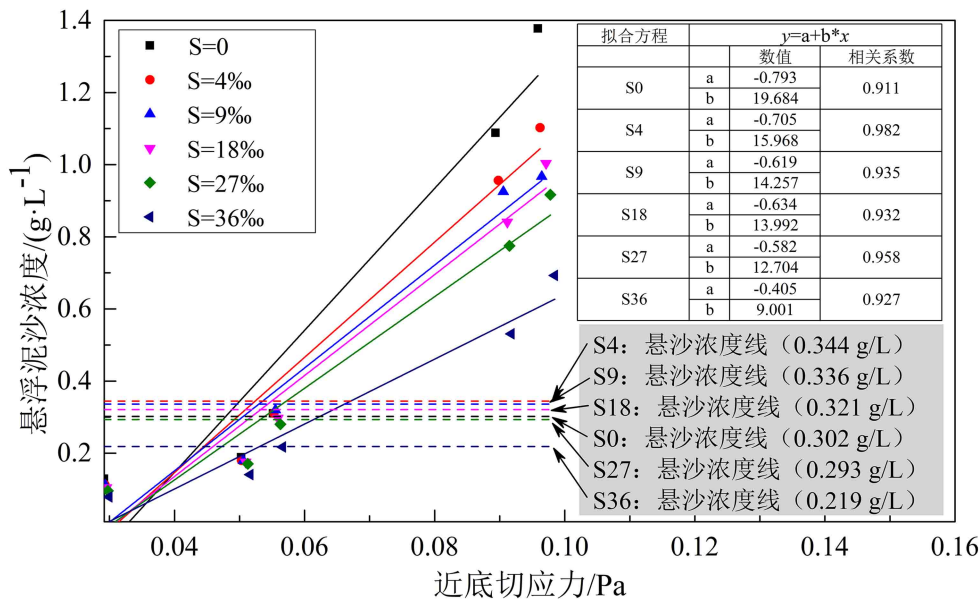


图 6 不同盐度环境下近底切应力与悬浮泥沙浓度关系 (5 h)

Fig.6 Relation between near-bed shear stress and SSCs under different salinity conditions (5 h)

表 2 不同盐度条件下沉积物临界切应力 (5 h)

Table 2 Critical shear stress of sediments under different salinity conditions (5 h)

盐度/%	0	4	9	18	27	36
临界侵蚀切应力/Pa	0.055 6	0.065 7	0.067 0	0.068 3	0.068 9	0.069 3

固结 5 h 沉积物,在盐度为 0~36‰的条件下发生固结及侵蚀过程,其临界切应力值为 0.055 6~0.069 3 Pa。淡水环境中,沉积物临界切应力相对较低,仅为 0.055 6 Pa。随着盐度环境的增高,沉积物的临界切应力随之增加。盐度为 0~9‰时,沉积物

临界切应力增长较快,盐度为 9‰时的沉积物临界切应力是淡水条件下的 1.18 倍,随着盐度的持续升高沉积物临界切应力缓慢增加,增量较小。

3.4.2 固结 24 h

土床固结 24 h 的各组近底切应力与最大浊度之间的关系如图 7,水体的近底切应力都与每一级切应力作用下的最大悬沙浓度呈正相关关系,相关系数 R 为 0.91~0.93。

根据以上方法,得到不同盐度环境下固结 24 h 沉积物的临界侵蚀切应力,如表 3。

固结 24 h 沉积物,在盐度为 0~36‰的条件下

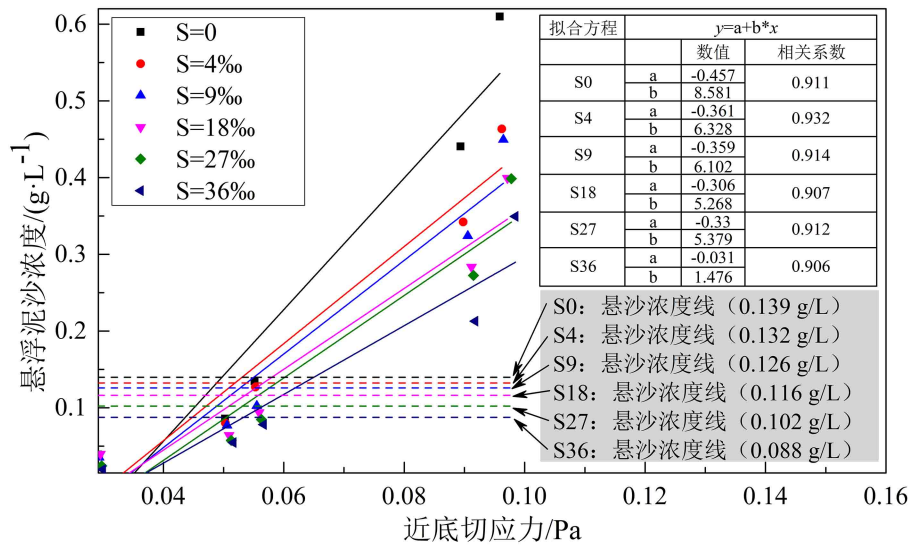


图 7 不同盐度环境下近底切应力与悬浮泥沙浓度关系 (24 h)

Fig.7 Relation between near-bed shear stress and SSCs under different salinity conditions (24 h)

表 3 不同盐度条件下沉积物临界切应力 (24 h)

Table 3 Critical shear stress of sediments under different salinity conditions (24 h)

盐度/‰	0	4	9	18	27	36
临界侵蚀切应力/Pa	0.069 5	0.077 9	0.079 5	0.080 1	0.080 3	0.080 6

发生固结、侵蚀过程,其临界切应力值为 0.069 5~0.080 6 Pa,大于固结 5 h 的沉积物,即随着固结时间的推移,沉积物临界切应力增加。淡水条件下,沉积物临界切应力相对较低,仅为 0.069 5 Pa,随着盐度增高,沉积物的临界切应力也相应增加。盐度为 0~9‰时,沉积物临界切应力增长较快,盐度为 9‰时的沉积物临界切应力是淡水条件下的 1.12 倍。

前人统计的世界河口沉积物的临界切应力为 0.012~0.196 Pa^[11], 0.025~0.245 Pa^[25],更大和更小的取值也有报道^[26-27]。由于前人对河口沉积物临界切应力的现场测试多用黏结力仪(CSM)进行测定,与循环水槽所得沉积物临界切应力得原理不同,此方法形成的侵蚀水流形态与自然水流结构相比,缺乏相似性,通常会产生一个比自然流更大的剪切力,使得所测沉积物临界切应力偏大。故本试验得到的临界切应力处于正常偏低范围。

4 讨论

通过对每一轮试验沉积物临界切应力的计算可知,不同固结程度的沉积物的临界切应力都随着盐度环境的变化而变化(图 8)。在本试验研究的范围(0~36‰)内,黄河水下三角洲细粒沉积物的临

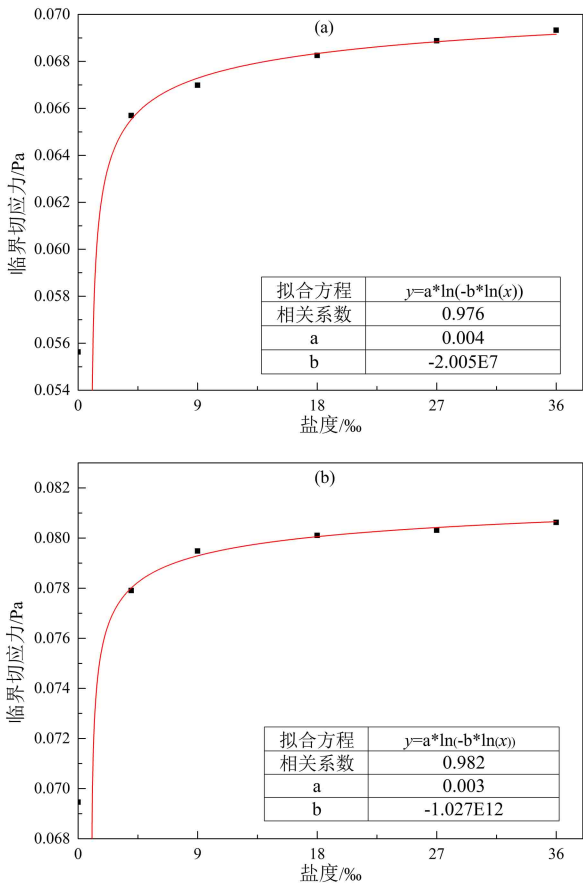


图 8 沉积物临界切应力分布图

a. 固结 5 h, b. 固结 24 h。

Fig.8 Sediment critical shear stress distribution

a. consolidation 5 h, b. consolidation 24 h.

界切应力为 0.055 6~0.080 6 Pa,其抗侵蚀性随着盐度环境的增加而增强。由于河口区盐度较低,使得该区沉积物抗侵蚀性较弱,容易发生侵蚀再悬浮过

程,随着距离河口区位置越远,海水盐度升高,该区域沉积物抗侵蚀性也相应增强。相同固结程度的沉积物的临界切应力均随着盐度环境的增加而呈对数增长趋势,关系式为 $y=a \times \ln(-b \times \ln(x))$,相关系数高达0.98, a 、 b 与沉积物的固结程度有关。当低盐度条件(小于9‰)下,盐度环境改变对沉积物的临界切应力影响尤其显著,即黄河入海口附近海域盐度较低,在该区工程建设时应充分考虑盐度对沉积物抗侵蚀性影响。沉积物固结时间为5 h、24 h时,盐度环境变化对其抗侵蚀性影响程度不同,高盐度(盐度36‰)条件下的临界切应力分别为淡水条件下的1.24倍、1.16倍。说明随着固结过程的进行,盐度环境的增加对沉积物临界切应力的促进作用减小。

本试验所用沉积物为砂质粉土,土颗粒以粉粒为主,黏粒起到联结的作用。随着盐度环境的增加,固结形成的沉积物颗粒间孔隙流体的盐度也相应增加,压缩了颗粒之间的双电层。双电层的大小影响着土体的稳定性,大的双电层使得土体不稳定,容易发生破坏^[28];而较小的双电层使得土颗粒与颗粒之间相互接近,排斥力减小,形成化学胶结,使土体强度增大。因此,水体盐度环境越高,使得在此条件下固结而成的沉积物含盐量越大,土床更加稳定,在相同近底切应力的作用下,水体中的悬浮泥沙浓度较低,再悬浮量更小,使得土床具有较高的抗侵蚀性。孔隙流体含盐量越大,颗粒聚集越多,当盐度增大到一定程度时,更多颗粒聚集搭建起颗粒骨架并形成较大孔隙,使得颗粒与颗粒之间距离增大,沉积物结构变松散,强度降低^[29]。通过对沉积物扫描电镜图像可知^[13,30],低盐度环境中沉积物骨架颗粒较大,容易颗粒间形成较大的孔隙,盐度环境的升高会增加土体的含盐量,使得颗粒间孔隙流体离子浓度增强,压缩了双电层,土颗粒间变密集,沉积物变稳定,从而导致土床抗侵蚀性增强^[9-10],而随着盐度环境的继续升高,更多颗粒聚集形成了大的孔隙,改变了沉积物的结构。

黄河水下三角洲新沉积的沉积物固结速度很快,在正常固结完成后,受周围环境的影响,沉积物的强度仍随着固结时间的增加持续增长,呈现与原状土体类似的超固结状态^[21]。Tan和Wang等^[31]通过水槽试验研究了固结时间对沉积物侵蚀速率的影响,发现在相同水动力条件下,沉积物侵蚀速率随着干容重和固结时间的增加持续增长。杨秀娟等^[21]通过自制沉降柱研究盐度环境对入海泥沙固结过程的影响,发现随着固结时间的推移,颗粒间

逐渐形成化学胶结,导致沉积物结构逐渐增强。与世界其他河口相比,黄河水下三角洲沉积物虽具有快速固结特性,但由于其独特的物质来源与水动力条件^[18],使得该区域侵蚀现象显著,除了现行河口缓慢向外淤进,其他海岸几乎均处于蚀退状态。

5 结论

(1)固结时间相同,沉积物的临界切应力随着盐度环境的增加而呈对数增长趋势,且在低盐度条件(小于9‰)下,盐度环境的变化对其抗侵蚀性影响显著,关系式为 $y=a \times \ln(-b \times \ln(x))$,其中 a 、 b 与沉积物的固结程度有关。即在进行工程设计时,应在低盐度条件下对于盐度变化予以充分考虑。

(2)固结时间不同,盐度环境变化对沉积物抗侵蚀性影响不同,随着固结时间的推移,盐度环境的增加对沉积物临界切应力的促进作用减小。

参考文献 (References)

- [1] 许丹,孙志林,祝丽丽,等. 钱塘江河口盐度数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 829-836. [XU Dan, SUN Zhilin, ZHU Lili, et al. Numerical simulation of salinity in Qiantang River Estuary [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(4): 829-836.]
- [2] Lin C L, Su J L, Xu B R, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem [J]. Progress in Oceanography, 2001, 49(1-4): 7-19.
- [3] 刘敏,侯立军,许世远,等. 盐度变化对崇明东部河口滩涂氮营养盐循环影响实验模拟研究[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(4): 6-9. [LIU Min, HOU Lijun, XU Shiyuan, et al. Experimental simulation of effect of changes of salinity on nitrogen cycling in the estuarine tidal flats of Chongming Island [J]. Marine Environmental Science, 2004, 23(4): 6-9.]
- [4] Maa J P Y, Sanford L, Halka J P. Sediment resuspension characteristics in Baltimore Harbor, Maryland [J]. Marine Geology, 1998, 146(1-4): 137-145.
- [5] Mehta A J, Parchure T M. Surface erosion of fine-grained sediment revisited [J]. Proceedings in Marine Science, 2000, 2: 55-74.
- [6] Parchure T M, Mehta A J. Erosion of soft cohesive sediment deposits [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(10): 1308-1326.
- [7] Houwing E J. Determination of the critical erosion threshold of cohesive sediments on intertidal mudflats along the Dutch Wadden Sea coast [J]. Estuarine, Coastal & Shelf Science, 1999, 49(4): 545-555.
- [8] Aberle J, Nikora V, Walters R. Effects of bed material properties on cohesive sediment erosion [J]. Marine Geology, 2004, 207(1-4): 83-93.
- [9] Kim K, Yoon H S, Lee I C, et al. An influence of salinity on resuspension of cohesive sediment [J]. Journal of Coastal Research, 2016, 75(sp1): 68-72.

- [10] Kimiaghalam N, Goharrokhi M, Clark S P, et al. A comprehensive fluvial geomorphology study of riverbank erosion on the Red River in Winnipeg, Manitoba, Canada [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1488-1498.
- [11] 宋敬泰. 黄河三角洲岸滩沉积物临界侵蚀剪应力研究[D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2009. [[SONG Jingtai. Study on sediment critical erosion stress on the tidal flat along the Yellow River Delta[D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2009.]]
- [12] 单红仙, 王伟宏, 刘晓磊, 等. 海水盐度对沉降泥沙固结过程影响研究[J]. *海洋工程*, 2015, 33(2): 50-57, 76. [SHAN Hongxian, WANG Weihong, LIU Xiaolei, et al. Effects of sea water salinity on the consolidation process of sediments settlement [J]. *The Ocean Engineering*, 2015, 33(2): 50-57, 76.]
- [13] 熊传芳, 单红仙, 张少同, 等. 黄河三角洲沉积物含盐量与其临界剪切应力的关系研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(23): 250-255. [XIONG Chuanfang, SHAN Hongxian, ZHANG Shaotong, et al. Relationship between salt content of Undisturbed Sediment and its critical shear stress [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(23): 250-255.]
- [14] 刘姣, 单红仙, 王伟宏, 等. 海洋盐度场对细粒沉积物临界剪应力影响[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 35-41. [LIU Jiao, SHAN Hongxian, WANG Weihong, et al. Influence of water salinity on critical shear stress of fine-grained sediments [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 35-41.]
- [15] 熊传芳, 单红仙, 朱超祁. 黄河口海域沉积物含盐量特征研究[J]. *地质论评*, 2017, 63(S1): 343-344. [XIONG Chuanfang, SHAN Hongxian, ZHU Chaoqi. Salt content of sediments in the Yellow River estuary [J]. *Geological Review*, 2017, 63(S1): 343-344.]
- [16] Maa J P Y, Wright L D, Lee C H, et al. VIMS Sea Carousel: A field instrument for studying sediment transport [J]. *Marine Geology*, 1993, 115(3-4): 271-287.
- [17] Pope N D, Widdows J, Brinsley M D. Estimation of bed shear stress using the turbulent kinetic energy approach-A comparison of annular flume and field data [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26(8): 959-970.
- [18] 贾永刚, 单红仙, 杨秀娟, 等. 黄河口沉积物动力学与地质灾害[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [JIA Yonggang, SHAN Hongxian, YANG Xiujuan, et al. Sediment dynamics and geologic hazards in the Estuary of Yellow River, China[M]. Beijing: Science Press, 2011.]
- [19] 孟祥梅, 贾永刚, 杨忠年, 等. 现代黄河三角洲潮滩沉积物抗侵蚀性原位试验[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(3): 39-45. [MENG Xiangmei, JIA Yonggang, YANG Zhongnian, et al. Field testing of the erodibility of tidal flat sediment in the modern Yellow River Delta [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(3): 39-45.]
- [20] 毕乃双, 杨作升, 王厚杰, 等. 黄河调水调沙期间黄河入海水沙的扩散与通量[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(2): 27-34. [BI Naishuang, YANG Zuosheng, WANG Houjie, et al. Characteristics of dispersal of the Yellow River water and sediment to the sea during water-sediment regulation period of the Yellow River and its dynamic mechanism [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 27-34.]
- [21] 杨秀娟, 贾永刚, 单红仙, 等. 水动力作用对黄河口沉积物强度影响的现场试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(4): 630-637. [YANG Xiujuan, JIA Yonggang, SHAN Hongxian, et al. Experimental study on impact of marine hydrodynamics on strength of seabed sediments in the Yellow River estuary [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(4): 630-637.]
- [22] 崔承琦, 孙晓霞, 施建堂, 等. 近代黄河三角洲海岸发育体系——黄河三角洲潮滩海岸时空谱系研究 II [J]. *海洋通报*, 2001, 20(5): 31-39. [CUI Chengqi, SUN Xiaoxia, SHI Jiantang, et al. Coastal development system of the modern Huanghe River Delta—Research II on the space-time lineage of the coastal tidal-flat of the Huanghe River Delta [J]. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(5): 31-39.]
- [23] van Raaphorst W, Malschaert H, Van Haren H. Tidal resuspension and deposition of particulate matter in the Oyster Grounds, North Sea [J]. *Journal of Marine Research*, 1998, 56(1): 257-291.
- [24] Zhang S T, Jia Y G, Zhang Y Q, et al. Influence of seepage flows on the erodibility of fluidized silty sediments: parameterization and mechanisms [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2018, 123(5): 3307-3321.
- [25] 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.
- [26] Schaaff E, Grenz C, Pinazo C, et al. Field and laboratory measurements of sediment erodibility: A comparison [J]. *Journal of Sea Research*, 2006, 55(1): 30-42.
- [27] 郑杰文, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 现代黄河三角洲沉积物临界剪应力研究[J]. *海洋学报*, 2015, 37(3): 86-98. [ZHENG Jiewen, JIA Yonggang, LIU Xiaolei, et al. Field measurement of sediment critical shear stress in the modern Yellow River Delta [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(3): 86-98.]
- [28] Sutarto T E. A combined flume-imaging technique for measuring fluvial erosion of cohesive stream bank soils [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 125: 368-375.
- [29] Qiao S Q, Shi X F, Zhu A M, et al. Distribution and transport of suspended sediments off the Yellow River (Huanghe) mouth and the nearby Bohai Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 337-344.
- [30] Zhang F Y, Wang G H, Kamai T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution [J]. *Engineering Geology*, 2013, 155: 69-79.
- [31] Tan G M, Wang J, Shu C W, et al. Effects of consolidation time and particle size on scour rates of cohesive sediment [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(2): 160-164.