

波浪作用下沉积物中重金属 Cu 释放规律研究

张皓清¹, 贾永刚^{1,2,3}, 荆少东⁴, 王凯歌⁵, 卢芳^{1,2,3}, 潘玉英⁶, 刘锦昆⁴

(1. 中国海洋大学 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237; 3. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 4. 中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026; 5. 青岛海关技术中心, 山东 青岛 266100; 6. 浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山 316022)

摘要: 黄河水下三角洲位于半封闭的渤海内部, 海底沉积物中重金属 Cu 污染严重, 且该区域多发风暴潮, 引起沉积物再悬浮甚至液化, 导致沉积物中重金属 Cu 重新释放进入海水中。本研究以黄河口粉质土作为底床, 采用室内波浪水槽试验模拟重金属 Cu 在不同水动力条件下, 通过静态扩散、底床未液化状态下再悬浮以及底床液化状态下再悬浮 3 种方式进入上覆水体的释放过程。结果表明: 上覆水体中重金属 Cu 的浓度分布与悬浮泥沙浓度分布密切相关, 呈现出一致的变化规律; 沉积物液化会明显促进重金属 Cu 向上覆水体中释放, 底床液化再悬浮阶段上覆水体中溶解态 Cu 的浓度为静态扩散阶段的 18 倍, 为底床非液化再悬浮阶段的 11 倍; 此外, 底床液化会导致沉积物中重金属 Cu 向深处扩散, 扩散深度约为沉积物液化深度的一半。

关键词: 波浪; 沉积物再悬浮; 沉积物液化; 重金属 Cu; 释放

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)09-0064-08

DOI: 10.11759/hyxx20190513001

黄河水下三角洲的重金属污染主要来自于石油开采、运输、泄露以及上游流域工业污染排放^[1], 进入海洋的重金属与水中悬浮颗粒物吸附结合沉降到海底^[2], 使沉积物成为重金属污染物的主要蓄积库。已有研究表明, 黄河口垦岛油田海域表层沉积物中重金属 Cu 含量相对较高^[3-4]。沉积物时刻与上覆水体进行着物质与能量交换, 随着水动力条件的变化, 重金属污染物通过溶解、解吸等作用由沉积物向水体迁移, 造成环境危害和生态风险^[5]。黄河水下三角洲地区海水受到重金属污染的原因在于存在外源污水排放与内源重金属再释放, 而相对于外源污水排放, 内源重金属释放更难以控制。

黄河水下三角洲地区海底沉积物容易发生液化运动, 海底沉积物内部细粒沉积物会被输运到沉积物表面, 进而进入上覆水体中成为再悬浮沉积物^[6]。郝廷等^[7]发现黄河三角洲沉积物在波浪扰动导致液化的条件下, 沉积物中重金属向上覆水体中的释放量明显增加, 且波浪扰动越大对重金属释放的促进作用越明显。Sun 等^[8]研究表明, 沉积物液化阶段总 Zn 浓度比固结阶段最高增加了 26 倍。目前, 沉积物再悬浮的实验室模拟研究主要采用环形流水槽^[9-10]、颗粒夹带模拟器^[11-12]和波浪水槽^[7, 13]等试验装置, 主要集中在湖泊、河流和河口等区域表层沉积物再悬浮过程中重金属释放研究^[14-16], 对于海洋沉积物中

重金属在波浪作用下至沉积物液化的释放过程研究相对较少。此外, 环形流水槽和颗粒夹带模拟器只能使表层沉积物发生再悬浮, 波浪水槽可用于底床液化沉积物再悬浮过程研究, 所以本文通过波浪水槽试验, 模拟不同波浪条件下底床沉积物再悬浮至液化的过程, 研究沉积物中重金属 Cu 在不同波浪条件下的释放过程和迁移规律, 为黄河水下三角洲沉积物中重金属 Cu 释放量估算提供科学依据。

1 试验装置、材料与方法

1.1 试验装置及材料

本文所采用的波浪水槽(4 m×0.4 m×1.0 m)如图 1 所示。水槽的右侧是造波装置, 造波装置往复推动水体形成波浪。水槽的左侧是消波装置, 可以减小波浪反射

收稿日期: 2019-05-13; 修回日期: 2019-07-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41807247)资助; 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目(U1606401)资助

[Foundation: National Natural Science Foundation For Young Scientist of China, No. 41807247; NSFC-Shandong Joint Found for Marine Science Research Centers, No. U1606401]

作者简介: 张皓清(1994-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向: 沉积物中内源污染物释放过程研究, E-mail: zhanghq0701@163.com; 卢芳, 通讯作者, 博士, 研究方向: 地表水质环境评价及模拟、沉积物内源污染物释放过程, E-mail: fang_lu1130@163.com

引起的干扰。在水槽中间位置安装电容式波高仪(RBR, Canada)收集实验过程中的波高和波周期, 整个系统通过计算机自动控制。沉积物槽(0.6 m×0.4 m×0.3 m)位于

水槽底部中间位置, 沉积物槽右侧距造波板 1.6 m。在沉积物槽中间, 深度为 15 cm 处放置孔隙水压力传感器, 用以测量波浪作用过程中孔隙水压力的变化趋势。

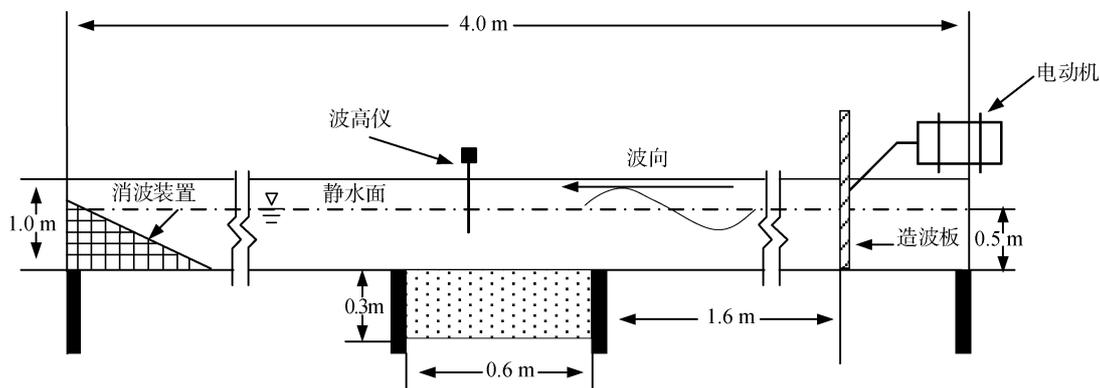


图 1 波浪水槽示意图
Fig. 1 Diagram of the wave flume

试验中用来铺设底床沉积物的土体取自黄河三角洲潮滩粉质土, 主要成分为粉砂, 砂土和黏土, 土样的黏粒含量 15%。为保证底床的均一性, 将取回的潮滩粉质土摊平风干, 结块拍散并混合均匀, 经 0.5 mm 振动筛筛选后用于底床铺设。试验所用上覆水体为采用海水素配置的盐度 35 的标准海水。

1.2 试验底床配制与铺设

称取 623.7 g $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 溶解到 10 kg 标准海水配制成重金属溶液, 然后与 33.0 kg 干土混合形

成含水率为 32% 的均匀泥浆(Cu 与干土的质量比为 4.99 mg/g)。为了使重金属 Cu 达到稳定的状态, 将配制好的含重金属泥浆静置 7 天备用(密封, 黑暗保存)。将剩余的土壤与适量的标准海水混合, 使得其含水率与含重金属土样中的含水率相同。首先将配制好的不含重金属 Cu 的泥浆转移到水槽底部至泥浆高度达到 25 cm, 在其上层均匀铺设厚度为 5 cm 的含重金属 Cu 泥浆层(图 2), 底床沉积物的总厚度为 30 cm。底床铺设完成后, 将 35‰ 盐度标准海水缓慢加入水槽中至水深达到 50 cm。

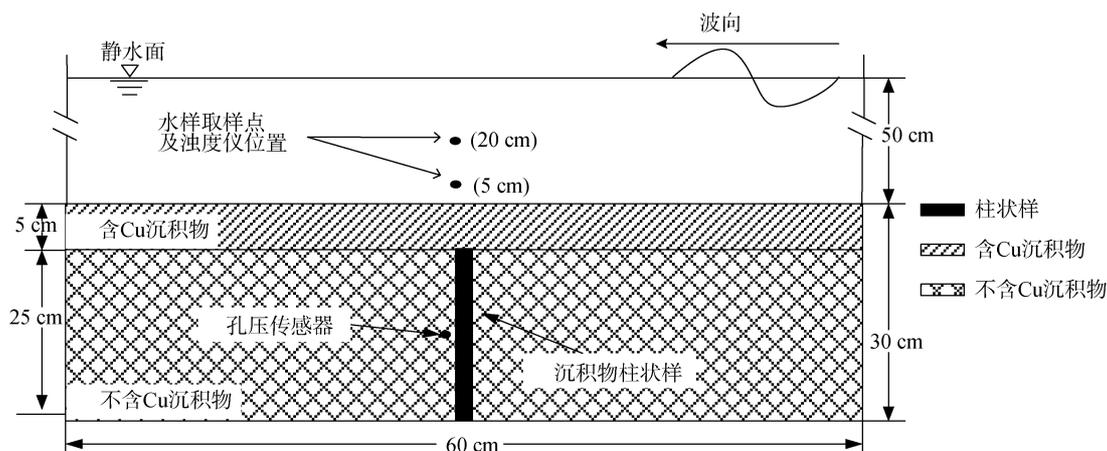


图 2 底床沉积物铺设示意图
Fig. 2 Schematic diagram of sediment laying

1.3 水槽试验过程及参数

整个水槽试验分为 3 个阶段: 静态扩散阶段(阶段 I), 5 cm 波高波浪作用阶段(阶段 II)和 10 cm 波高

波浪作用阶段(阶段 III)。

阶段 I 上覆水体静止, 底床沉积物处于静态扩散状态, 持续时间为 40 h。阶段 II 和阶段 III 是波浪作

用阶段, 每个波高持续 180 min。阶段 I 中, 每隔 8 h 用自制的水样取样器在底床左侧 30 cm, 沉积物上方 5 cm, 20 cm 两个取样点(图 2)各取 50 mL 水样, 由于取样量较小, 每次取水样后不向水槽内补充空白水样。每个取样点取 3 个平行样品, 样品中加硝酸, 低

温(4℃)保存, 待测定样品中溶解态 Cu 浓度。阶段 II 和阶段 III 从波高稳定后开始计时, 前 60 min 每隔 10 min 取一次水样, 后 120 min 每隔 20 min 取一次水样。取样位置及方法同阶段 I, 试验波浪参数及试验过程如表 1 所示。

表 1 波浪参数及取样时间

Tab. 1 Wave parameters and sampling arrangements

阶段	波浪参数			波浪作用时间	取样时间
	波高/cm	波长/m	周期/s		
静态扩散(阶段 I)	-	-	-	40 h	间隔 8 h 取一次
5 cm 波高波浪作用(阶段 II)	5.0	0.35	2.5	180 min	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 min
10 cm 波高波浪作用(阶段 III)	10.0	0.18	1.3	180 min	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 min

浊度仪(RBR, Canada)用自制的支架固定在水槽上部, 使浊度仪的浊度探头固定在底床沉积物上方 5 cm 和 20 cm 处, 与水样取样点位置相同, 用以观测取样点位置悬浮泥沙浓度变化。孔隙水压力测量采用 DEWESoft 瞬态数据采集仪(Europe, DEWE-43), 孔隙水压力传感器(CYY2)连接数据采集仪将电压数据转化为孔隙水压力数据, 然后通过输出端传至电脑。将孔隙水压力传感器埋设在底床沉积物 15 cm 深度处, 用于测量底床沉积物中孔隙水压力变化。

试验结束后, 用活塞取样器分别在距沉积物槽左侧边缘 10 cm, 30 cm 和 50 cm 处取长度为 24 cm(底床被波浪侵蚀破坏, 试验结束底床厚度剩余 24 cm)沉积物柱状样(见图 2), 将柱状样每隔 2 cm 进行切割, 每个深度取 3 个平行样品, 用以测定底床沉积物不同深度处 Cu 含量。

1.4 样品分析方法

水样和底泥中重金属 Cu 浓度测定采用消解法。取 25.0 mL 水样置于锥形瓶中, 加入硝酸, 在加热板上消解, 至水样剩余 2~3 mL 后取下冷却至室温, 定容到 25.0 mL 比色管中, 备测。取 0.25 g 底泥置于四聚氟乙烯的烧杯中, 加入 5 mL 盐酸在加热板上低温加热, 蒸发至混合液剩余 2 mL, 取下稍冷, 加入 4 mL 硝酸、4 mL 氢氟酸、3 mL 高氯酸, 消解至溶液呈黏稠状态, 消解完成后冷却至室温, 定容到 25.0 mL 比色管中, 备测。用电感耦合等离子体发射光谱仪(PE Optima 8000, American)测定样品中重金属 Cu 含量, 重金属 Cu 的回收率在 93%~105%。

试验前对浊度仪进行室内标定, 配制 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 g/L 悬浮泥沙溶液, 用浊度仪分别

测得对应值, 标定得到的相关系数 $R^2=0.99$ 。试验过程中采用浊度仪测定水中悬浮泥沙浓度。

2 试验结果

本文上覆水体和沉积物中重金属 Cu 浓度值是每个取样点所取的 3 个样品测定浓度值的平均值。

2.1 底床沉积物孔隙水压力变化特征

波浪作用下底床沉积物孔隙水压力随时间变化的趋势如图 3a 所示。在 5 cm 波高波浪作用下, 孔隙水压力迅速升高但波动幅度较小, 此阶段孔隙水压力增加后迅速减小, 由波浪作用引起的孔隙水压力增加速率小于沉积物土体孔隙水压力消散速率, 因此孔隙水压力无明显累积^[17]。此阶段透过水槽玻璃边壁观察到只有少量悬浮颗粒漂浮在沉积物上方, 底床沉积物并未发生液化运动。10 cm 波高波浪作用下, 孔隙水压力迅速升高达到峰值且波动幅度较大, 由波浪作用引起的孔隙水压力增加速率大于沉积物土体孔隙水压力消散速率, 此阶段观察到底床沉积物变成随波浪左右振荡的流体, 底床沉积物发生液化^[18]。

2.2 上覆水体中悬浮泥沙含量变化特征

在连续波浪作用下上覆水体中悬浮泥沙浓度变化如图 3b 所示。悬浮泥沙浓度随着波高的增加而增加, 5 cm 波高波浪作用期间悬浮泥沙浓度范围为 0.051~0.162 g/L, 10 cm 波高波浪作用期间悬浮泥沙浓度范围为 0.837~1.146 g/L。10 cm 波高作用阶段比 5 cm 波高作用阶段悬浮泥沙浓度增加 6~8 倍。波浪作用刚开始时, 悬浮泥沙浓度迅速升高, 20~30 min

后趋于稳定,且底层(沉积物上方 5 cm 处)和上层(沉积物上方 20 cm 处)悬浮泥沙浓度变化趋势一致。

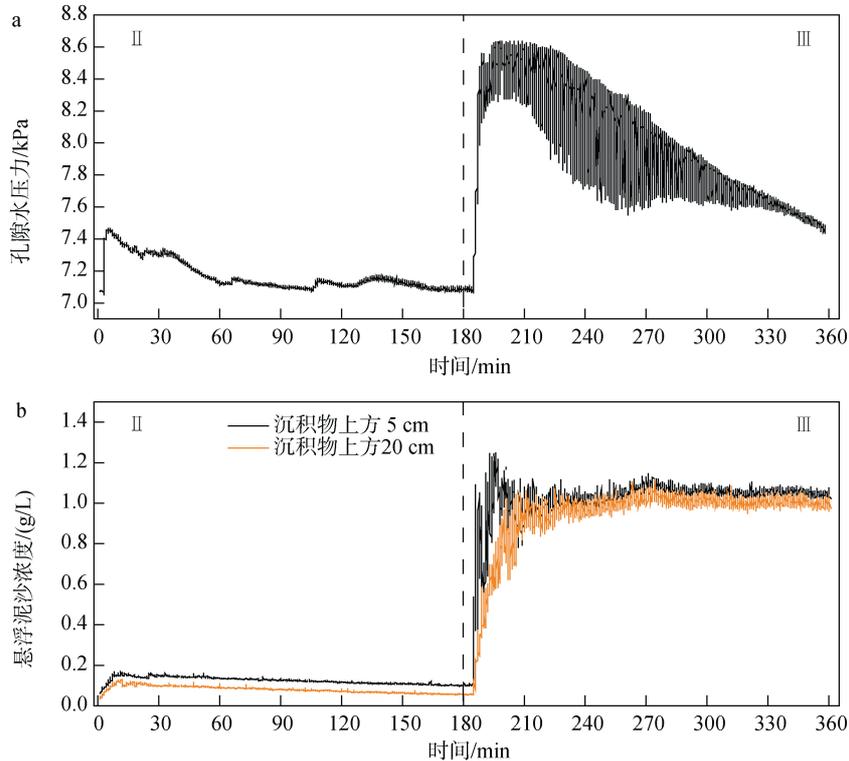


图 3 孔隙水压力变化特征(a); 悬浮沉积物浓度(b)

Fig. 3 Pore water pressure variation(a); suspended sediment concentration(b)

注: II: 5 cm 波高波浪作用未液化阶段; III: 10 cm 波高波浪作用液化阶段

2.3 上覆水体中溶解态重金属 Cu 浓度变化特征

不同阶段上覆水体中溶解态 Cu 浓度如图 4 所示。阶段 I, 上覆水体中溶解态 Cu 浓度变化范围为

0.45~0.67 mg/L, 随时间大致呈先下降后上升的趋势。阶段 II, 5 cm 波高波浪作用下, 水中溶解态 Cu 浓度变化范围为 0.54~0.85 mg/L, 溶解态 Cu 浓度随时间呈先上升后下降的趋势。阶段 III, 10 cm 波高波

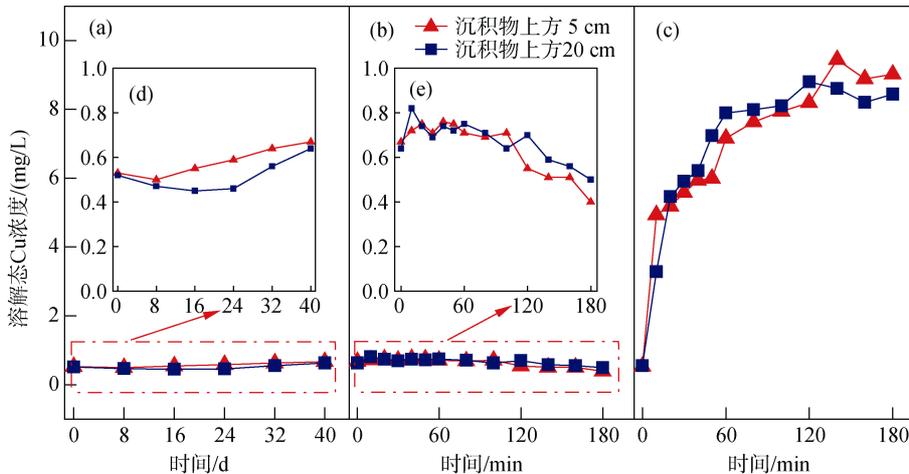


图 4 各阶段水中 Cu 浓度随时间的变化特征

Fig. 4 Variation of Cu concentration in water at different stages

注: a: 静态扩散阶段; b: 5 cm 波高作用未液化阶段; c: 10 cm 波高作用液化阶段; d、e 分别为 a、b 虚线区域放大图

浪作用下,在加波较短时间内上覆水体中溶解态 Cu 浓度迅速升高,大约 80 min 后开始呈平稳上升趋势,水中溶解态 Cu 浓度变化范围为 0.54~9.02 mg/L。

2.4 底床沉积物中重金属 Cu 含量的变化

10 cm 波高波浪作用下,底床沉积物发生液化,沉积物表层侵蚀深度为 6 cm,因此对侵蚀层下方高度为 24 cm 的沉积物取柱状样进行分析。

底床沉积物中重金属 Cu 含量分布如图 5 所示。水平方向上,三个取样位置的重金属 Cu 浓度差异不大。重金属 Cu 含量随深度的变化趋势为先上升后下降,污染浓度峰值区出现在污染层下方 2~3 cm 处。沉积物中重金属 Cu 含量变化范围为 2.6~2 660 mg/kg。

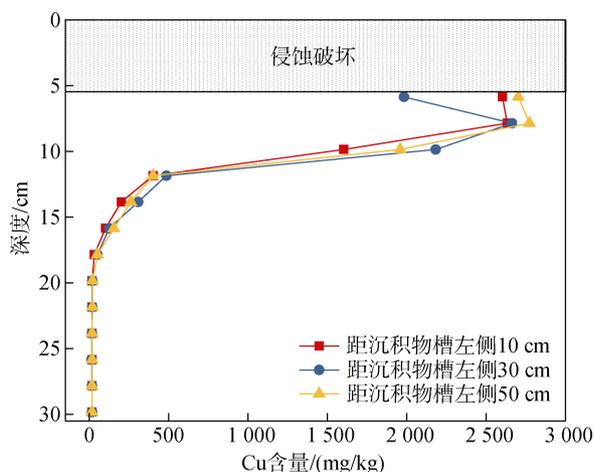


图 5 沉积物中 Cu 浓度分布

Fig. 5 Cu concentration distribution in the sediment

3 分析与讨论

3.1 上覆水体中重金属 Cu 浓度变化

阶段 I, 试验初始阶段水体中溶解态 Cu 浓度较高(图 4a), 可能是向水槽加水过程中水流对沉积物表层冲刷导致。水中溶解态 Cu 浓度在 8 h 后缓慢升高, 此阶段沉积物中重金属 Cu 向上覆水体释放的途径主要包括: 由于底床表层铺设的污染层与上覆水体中的溶解态 Cu 存在浓度差, 重金属 Cu 通过静态扩散释放到上覆水体中; 此外, 由于含水率较高的重塑底床沉积物会固结排水, 沉积物中重金属 Cu 在固结过程中随孔隙水逐渐排入上覆水体^[7], 二者共同作用导致上覆水体中的溶解态 Cu 浓度升高。

阶段 II, 在 5 cm 波高波浪作用下, 悬浮泥沙浓度小幅度升高(图 3b), 并观察到沉积物表层发生泥

沙再悬浮。水中溶解态 Cu 浓度先上升后下降, 而且波浪作用后期水中溶解态 Cu 浓度低于静态扩散阶段(图 4)。此阶段导致上覆水体中溶解态 Cu 浓度增加的原因有两方面: 一方面在波浪作用下, 波峰和波谷压力差作用使沉积物中重金属 Cu 随孔隙水扩散到上覆水体中^[19]; 另一方面沉积物再悬浮进入上覆水体后, 吸附在泥沙颗粒上的部分 Cu 发生解吸作用^[20], 也增加了上覆水体中溶解态 Cu 浓度。波浪作用 30 分钟后, 水中悬浮泥沙浓度缓慢下降, 溶解态 Cu 浓度也随之减小, 水中溶解态 Cu 的浓度分布和悬浮泥沙浓度分布规律基本一致。波浪作用会导致上覆水体和沉积物中溶解氧浓度增加^[21-22], 悬浮颗粒中的铁锰离子被氧化, 在悬浮颗粒物表层形成铁锰氧化层, 吸附大量溶解态 Cu, 随后沉淀返回底床沉积物^[23-24]。另外, 在波浪作用下, 水中悬浮颗粒越来越细^[25-26], 细颗粒具有较大的比表面积, 对溶解态 Cu 的吸附能力也随之增强^[27], 导致溶解态 Cu 浓度下降。该阶段上覆水体中溶解态 Cu 浓度增加幅度较小, 底床沉积物中重金属 Cu 向上覆水体中的释放途径以再悬浮泥沙的解吸作用和孔隙水中溶解态 Cu 扩散作用为主。

阶段 III, 在 10 cm 波高波浪作用下, 底床孔隙水压力累积并急剧增大, 导致底床沉积物发生液化, 观察到底床沉积物变成振荡的流体。上覆水体中悬浮泥沙浓度迅速升高(见图 3b), 且溶解态 Cu 浓度随之增大(见图 4c), 溶解态 Cu 的浓度和悬浮泥沙浓度变化规律基本一致。液化阶段水体中溶解态 Cu 浓度比未液化阶段增加了 11 倍, 底床液化后, 沉积物与上覆水体发生的剧烈混合^[28], 促进了底床沉积物中 Cu 的释放。波浪作用 80 分钟后, 上覆水体中悬浮泥沙浓度保持相对稳定, 但随着底床液化深度增加, 液化层下方的底床结构不断强化^[18], 沉积物颗粒变紧凑, 间隙变小, 此过程引起底床孔隙水向上渗流进入上覆水体^[29], 进而导致水中溶解态 Cu 浓度依然呈现缓慢上升趋势。此外, 至阶段 III 时波浪作用已持续较长时间, 水体中溶解氧浓度达到较高水平, 沉积物再悬浮使还原态沉积物暴露于有氧环境中, 沉积物中有机质结合态重金属和硫化物结合态重金属发生氧化反应而释放^[24], 使水中的溶解态 Cu 浓度升高。

3.2 底床沉积物中重金属 Cu 迁移扩散规律

沉积物中重金属 Cu 含量在水平方向上分布均匀, 波浪作用使污染层中的重金属 Cu 均匀向下扩散, 试验初期铺设的污染层下方 2~3 cm 深度范围内出现

Cu 浓度峰值区(图 5), 至 12 cm 深度处逐渐接近初始浓度。分析污染物向深处扩散是多个因素共同作用导致的。首先, 液化范围内沉积物变成左右振荡的流体, 加剧了沉积物颗粒和孔隙水的混合, 引起重金属 Cu 的垂直扩散, 沉积物最大液化深度约为 20 cm, 其中 12 cm 深度以下沉积物中重金属 Cu 浓度接近初始值, 沉积物中重金属 Cu 的扩散深度约为其液化深度的一半; 另外, 由于表层铺设的污染沉积物与下方未污染沉积物的孔隙水中重金属 Cu 存在浓度差, 会导致 Cu 向下方低浓度区域扩散。

4 结论

本文通过波浪水槽试验, 研究不同波浪作用下沉积物中重金属 Cu 的迁移释放规律, 分析不同阶段沉积物中重金属 Cu 的迁移释放特征, 得出如下结论:

(1) 静态扩散阶段, 沉积物中重金属 Cu 向上覆水体迁移的主要途径是孔隙水中溶解态 Cu 的静态扩散, 同时底床的固结排水对溶解态 Cu 的释放有一定的促进作用。

(2) 未液化再悬浮阶段, 上覆水体中溶解态 Cu 最大浓度约为初始浓度的 1.6 倍, 5 cm 波高波浪作用对沉积物中 Cu 的释放作用不明显, 且波浪作用后期由于悬浮颗粒的吸附作用, 上覆水体中溶解态 Cu 的平均浓度低于静态扩散阶段。

(3) 液化再悬浮阶段, 底床液化对沉积物中重金属 Cu 的释放有明显促进作用。上覆水体中溶解态 Cu 浓度为静态扩散阶段的 18 倍, 为非液化阶段溶解态 Cu 浓度的 11 倍。

(4) 底床液化加剧了沉积物中重金属 Cu 向深处扩散, 沉积物中重金属 Cu 向下扩散深度约为其液化深度的一半。

参考文献:

[1] 田莉萍, 孙志高, 王传远, 等. 调水调沙工程黄河口近岸沉积物重金属和砷含量的空间分布及其生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5529-5540.
Tian Liping, Sun Zhigao, Wang Chuanyuan, et al. Spatial distribution of heavy metals and As concentrations and assessment of their ecological risk in inshore sediments, affected by the Flow-sediment Regulation Scheme in the Yellow River estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5529-5540.

[2] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. 环境科学, 2013, 34(4):

1324-1332.
Wu Bin, Song Jinming, Li Xuegang. Environmental geochemistry characteristics of heavy metals in surface sediment in Yellow River Estuary[J]. Environmental Science, 2013, 34(4): 1324-1332.

[3] 李永霞, 郑西来, 孙娟. 埕岛油田海域重金属含量分布与生态环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 190-194.
Li Yongxia, Zheng Xilai, Sun Juan. Distributions and ecological assessment of heavy metals of Chengdao Oilfield sea areas[J]. Marine Environmental Science, 2012, 31(2): 190-194.

[4] 卢芳. 胜利埕岛油田海洋石油勘探开发生态环境影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Lu Fang. Eco-environmental impact of Shengli Chengdao offshore oil exploration and development[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.

[5] Hiller E, Jurkovič E, Šutriepka M. Metals in the surface sediments of selected water reservoirs, Slovakia[J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2010, 84(5): 635-640.

[6] 张少同, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 现代黄河水下三角洲沉积物动态变化过程的特征与机理[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(6): 33-44.
Zhang Shaotong, Jia Yonggang, Liu Xiaolei, et al. Feature and mechanism of sediment dynamic changing processes in the modern yellow river delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(6): 33-44.

[7] 郝廷. 波浪扰动条件下沉积物中 Zn、Cu 释放规律水槽试验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Hao Ting. Flume experiment study on the Zn and Cu release under wave disturbance[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

[8] Sun Z, Xu G, Hao T, et al. Release of heavy metals from sediment bed under wave-induced liquefaction[J]. Marine pollution bulletin, 2015, 97(1-2): 209-216.

[9] Wang H, Zhou Y, Wang X. Transport dynamics of Cr and Zn between deposited sediment and overlying water[J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2016, 44(11): 1453-1460.

[10] Zheng S, Wang P, Wang C, et al. Distribution of metals in water and suspended particulate matter during the resuspension processes in Taihu Lake sediment, China[J]. Quaternary international, 2013, 286: 94-102.

[11] Cantwell M G, Burgess R M, King J W. Resuspension of contaminated field and formulated reference sediments Part I: Evaluation of metal release under controlled laboratory conditions[J]. Chemosphere, 2008, 73(11): 1824-1831.

[12] Cantwell M G, Burgess R M. Variability of parameters measured during the resuspension of sediments with a particle entrainment simulator[J]. Chemosphere, 2004,

- 56(1): 51-58.
- [13] 郝廷, 许国辉, 王刚, 等. 底床液化下沉积物中重金属释放规律的水槽试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2013, 43(8): 92-98.
Hao Ting, Xu Guohui, Wang Gang, et al. Laboratory flume study on heavy metal release from liquefied bed sediments[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(8): 92-98.
- [14] 王晟亦, 盛媛, 张军, 等. 再悬浮作用下大环江和刁江沉积物中 Pb、Cd 和 As 的释放[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(7): 86-92.
Wang Shengyi, Sheng Yuan, Zhang Jun, et al. Effects of sediment re-suspension on release of Pb, Cd and As in sediments from Dahuan River and Diao River[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(7): 86-92.
- [15] 陆健刚, 钟燮, 吴海真, 等. 不同水动力下湖泊沉积物重金属释放通量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 248-253.
Lu Jiangang, Zhong Xie, Wu Haizhen, et al. Release of heavy metals in lake sediments under hydrodynamic flux[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 248-253.
- [16] 杨长明, 张芬, 徐琛. 巢湖市环城河沉积物重金属形态及垂直分布特征[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 1404-1410.
Yang Changming, Zhang Fen, Xu Chen. Chemical Speciation and Vertical Distribution Characteristics of Heavy Metals in Sediment Cores of an Urban River from a Typical City in Chaohu Lake Watershed[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(9): 1404-1410.
- [17] 宋玉鹏, 孙永福, 杜星, 等. 波浪作用下海底粉土孔隙水压力响应过程监测研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(2): 208-214.
Song Yupeng, Sun Yongfu, Du Xing, et al. Monitoring of silt pore pressure responding process to wave action[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(2): 208-214.
- [18] Jia Y, Zhang L, Zheng J, et al. Effects of wave-induced seabed liquefaction on sediment re-suspension in the Yellow River Delta[J]. Ocean Engineering, 2014, 89: 146-156.
- [19] Xu G, Sun Z, Fang W, et al. Release of phosphorus from sediments under wave-induced liquefaction[J]. Water Research, 2018, 144: 503-511.
- [20] 李猛, 毕春娟, 张晶晶, 等. 再悬浮作用对长江口潮滩 Hg 释放影响的实验室模拟研究[J]. 环境科学, 2011, 32(11): 3318-3326.
Li Meng, Bi Chunjuan, Zhang Jingjing, et al. Laboratory simulation study on the influence of resuspension on the release of mercury from Yangtze estuarine tidal flat[J]. Environmental Science, 2011, 32(11): 3318-3326.
- [21] 王永平, 吴挺峰, 丁艳青, 等. 波浪对太湖梅梁湾底泥氧气侵蚀深度的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 126-130.
Wang Yongping, Wu Tingfeng, Ding Yanqing, et al. Effects of waves on oxygen penetration depth of sediment from Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2011, 39(2): 126-130.
- [22] 王乐. 波浪作用下水体复氧行为特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Wang Le. Research on reoxygenation behavior characteristics of wave[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [23] Atkinson C A, Jolley D F, Simpson S L. Effect of overlying water pH, dissolved oxygen, salinity and sediment disturbances on metal release and sequestration from metal contaminated marine sediments[J]. Chemosphere, 2007, 69(9): 1428-1437.
- [24] 俞慎, 厉红波. 沉积物再悬浮-重金属释放机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1724-1731.
Yu Shen, Li Hongbo. Perspectives on the release of heavy metals via sediment resuspension[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1724-1731.
- [25] 华祖林, 王苑. 水动力作用下河湖沉积物污染物释放研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 95-105.
Hua Zulin, Wang Yuan. Advance on the release of pollutants in river and lake sediments under hydrodynamic conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(2): 95-105.
- [26] 韩丹岫, 庞重光, 李广伟. 波浪作用下细颗粒泥沙悬移特性的试验研究[J]. 海洋科学, 2008, 32(6): 46-51.
Han Danxiu, Pang Congguang, Li Guangwei. Experimental study on characteristics of suspended fine sediment under wave-loading[J]. Marine Sciences, 2008, 32(6): 46-51.
- [27] Villaescusa-Celaya J A, Gutiérrez-Galindo E A, Flores-Muñoz G. Heavy metals in the fine fraction of coastal sediments from Baja California (Mexico) and California (USA)[J]. Environmental Pollution, 2000, 108(3): 453-462.
- [28] Xu G, Sun Y, Yu Y, et al. Discussion on storm-induced liquefaction of the superficial stratum in the Yellow River subaqueous delta[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 14(1): 80-89.
- [29] Liu X L, Jia Y G, Zheng J W, et al. Experimental evidence of wave-induced inhomogeneity in the strength of silty seabed sediments: Yellow River Delta, China[J]. Ocean Engineering, 2013, 59: 120-128.

Study on the release of Cu in sediments due to wave-induced liquefaction

ZHANG Hao-qing¹, JIA Yong-gang^{1, 2, 3}, JING Shao-dong⁴, WANG Kai-ge⁵,
LU Fang^{1, 2, 3}, PAN Yu-ying⁶, LIU Jin-kun⁴

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100; 2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237; 3. Key Laboratory of Marine Environment & Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100; 4. Sinopec Petroleum Engineering Corporation, Dongying 257026; 5. Qingdao Customs Technology Center, Qingdao 266100, China; 6. College of Fisheries, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022)

Received: May 13, 2019

Key words: wave; sediment resuspension; sediment liquefaction; heavy metal Cu; release

Abstract: The underwater delta of the Yellow River is located in the semi-enclosed Bohai Sea. The sediment in this area is seriously polluted with heavy metal Cu. Wave-induced resuspension, and even the liquefaction of sediments, may lead to the re-release of heavy metal Cu in these sediments. In the present study, an indoor wave tank experiment, which used silty soil collected from the Yellow River Delta as the sediment, was used to simulate the release of heavy metal Cu through static diffusion, non-liquefied resuspension, and liquefied resuspension under different hydrodynamic conditions. Results showed that the concentration distribution of heavy metal Cu in the overlying water body was closely related to the concentration distribution of suspended sediment, and showed a consistent variation. Sediment liquefaction promoted the release of heavy metal Cu into the overlying water. The concentration of Cu in the overlying water in the liquefied resuspension stage was 18 times that in the static diffusion stage, and 11 times that in the non-liquefied resuspension stage. The liquefaction of the sediment caused the downward diffusion of the bottom layer of Cu into the sediment. The downward diffusion depth of Cu was approximately half the depth of the liquefied sediment.

(本文编辑: 赵卫红)