再悬浮作用对长江口潮滩 Hg 释放影响的实验室模拟 研究

李猛,毕春娟*,张晶晶,吕金刚,陈振楼

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室,上海 200062)

摘要:利用再悬浮装置研究不同扰动强度、不同盐度下,再悬浮作用对长江口中、低潮滩沉积物中 Hg 释放的影响.结果表明, 在扰动期间,上覆水环境(pH、Eh、DO、TSS等)剧变.在再悬浮实验中,上覆水中 HgD(溶解态汞)和 HgP(颗粒态汞)含量分 别主要集中在0.152~2.657 µg·L⁻¹、0.080~2.722 µg·L⁻¹范围内.再悬浮作用使得盐度为4.1% (8.0% (10.0% (13.0% 条 件下的中潮滩及盐度为13.0% 条件下的低潮滩都发生了汞释放,释放的汞含量为0.053~0.673 µg·g⁻¹,但对盐度为4.1% (8.0% (10.0% 条件下的低潮滩汞释放影响并不明显,这反映了上覆水盐度对再悬浮中汞释放具有重要影响.同时,也表明再 悬浮作用对长江口中、低潮滩的 Hg 释放影响也有差异,中潮滩表现出了比低潮滩要明显的汞释放.扰动动力为(210±5) r·min⁻¹时能明显增加汞的解吸,从而对汞释放产生影响.

关键词:长江口潮滩;再悬浮;汞释放;盐度;沉积物底质

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)11-3318-09

Laboratory Simulation Study on the Influence of Resuspension on the Release of Mercury from Yangtze Estuarine Tidal Flat

LI Meng, BI Chun-juan, ZHANG Jing-jing, LÜ Jin-gang, CHEN Zhen-lou

(Key Laboratory of Geography Information Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Using a Particle Environment Simulator, laboratory simulation experiment on the influence of resuspension on the release of mercury from sediments collected from medium tidal flat and low tidal flat in Chongming Dongtan was conducted. Results indicated that the conditions of overlying water changed significantly during resuspension. The concentrations of HgD and HgP were mainly in the rang of 0. 152-2. 657 μ g·L⁻¹, 0. 080-2. 722 μ g·L⁻¹ separately. In the resuspension processes, mercury was released from the medium intertidal sediments under the salinity condition of 4. 1%, 8. 0%, 10. 0%, 13. 0%, and from the low intertidal sediments under the salinity condition of 4. 1%, 8. 0%, 10. 0%, 13. 0%, and from the low intertidal sediments under the salinity condition of 4. 1%, 8. 0%, 10. 0%, 13. 0%, and important effect on resuspension. In different salinity condition, the release of mercury was different. And the release of mercury from medium tidal flat and low tidal flat was different during the resuspension periods, the release of mercury from the medium intertidal sediment was significantly higher than the release from the low intertidal sediment. When the rotate speed was(210 ± 5) r·min⁻¹, the desorption of mercury significantly increased, thereby the rotate speed had an effect on the release of mercury.

Key words: Yangtze Estuary tidal flat; resuspension; mercury release; salinity; seabed sediment

汞作为稀有的分散元素,广泛存在于各介质之中^[1].其中,在水体中汞除表现为离子态外,还能与OH⁻、Cl⁻等形成稳定的络合物,随水体发生迁移^[2].但由于水体中悬浮物质和沉积物对离子态汞和络合态汞有强烈吸附作用,会束缚汞的自由活动能力,使汞随颗粒物一起沉降进入沉积物中,从而起到净化水体的作用^[3,4].潮滩地区也因此成为消减污染物入海的重要屏障^[5].

但在再悬浮过程中,潮汐、波浪、生物活动等 产生的水体扰动会破坏浅层水体沉积物表面的稳定 性^[6],沉积物会重新进入水体,当沉积环境或水体 环境条件改变后,沉积物中的重金属会重新释放进 入上覆水中^[7,8].例如,沉积物中的硫化物在缺氧条 件下能吸附 Hg,但这部分沉积物在进入水体后,硫 化物与金属硫化物会被氧化,其结合的 Hg 将释放 出来^[9,10].在吸附与解吸行为中,汞在水环境中的 行为与悬浮颗粒物存在高度的相关性^[11,12],通过颗 粒物的沉降和再悬浮,汞在上覆水和沉积物之间迁 移^[13].一旦汞通过再悬浮过程进入上覆水中,汞的 生物有效性将会增加,对生态系统的毒害效应就会 加大^[14],从而成为 Hg 污染的一个重要来源^[15].

收稿日期:2011-01-11:修订日期:2011-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40701164,40971259);国家水 体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-006)

作者简介:李猛(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市水资源与水环境, E-mail:leemnn@163.com

^{*} 通讯联系人, E-mail: cjbi@ geo. ecnu. edu. cn

沉积物再悬浮过程在水体较浅的长江口潮滩地 区尤为明显.长江口潮滩地带属于特殊的开放系统, 长江径流和河口区潮汐系统汇合,水动力作用复杂, 各种环境物理化学因子变化剧烈带来的影响较 大^[16].目前,对于再悬浮作用的研究主要集中于海 湾、湖泊等^[17,18],而对河口潮滩交互作用强烈地带 的再悬浮研究较少.尤其是对于不同扰动动力条件 和盐度等条件对再悬浮作用影响的研究一直没有完 整的结论.本研究主要通过利用再悬浮模拟装置在 实验室实现再悬浮过程模拟,来探讨不同扰动动力、 不同盐度上覆水^[19,20]对长江口潮滩不同底质沉积 物中汞释放特征的影响,以期为控制河口水体中 Hg

1 材料与方法

1.1 样品采集

2009 年 10 月在长江口崇明东滩(采样点见图 1) 落潮时,分别在低潮滩(N31°30.003′,E121° 59.084′)和中潮滩(N31°32.673′,E121°57.903′)采 样点附近,用内径为 127 mm,高 280 mm 的有机玻 璃圆柱管采集约 200 mm 高的沉积物柱样各 9 根, 并分别标号 L0~L8(低潮滩)和 M0~M8(中潮滩). 此外,在附近水域,用有机玻璃采水器采集 40 L 上 覆水.测定现场参数后,柱样均避光密闭封好,迅速 带回实验室于 0~4℃下冷藏保存.

的生物有效性及其潜在危害提供科学依据.



图 1 研究区与采样点示意 Fig. 1 Sketch map of study area and sampling

1.2 实验方法

1.2.1 实验模拟装置

本研究采用的是 Tsai 等^[21]于 1986 年设计的再 悬浮装置(PES).该装置被证实实验过程重现性好, 经过改进可进行不同强度再悬浮模拟以及不同性质 沉积物再悬浮过程的比较^[22-24].其主要原理是:通 过穿有圆孔的有机玻璃板在水柱中上下摆动产生扰 动,在沉积物-水界面产生剪应力,使沉积物发生再 悬浮.为了控制再悬浮发生的强度,一般控制板摆 幅、摆动频率以及板与沉积物间距.当穿孔板在距 沉积物界面 5~7.5 cm 之间摆动时,产生 0.2、0.3、 0.4、0.5 N·m⁻² 剪应力所需的电机转速分别为 375、500、600 和 750 r·min^{-1[25]}.研究发现:低能再 悬浮扰动事件(剪应力 < 0.2 N·m⁻²)对再悬浮重金 属释放的贡献达到 60%^[26].同时根据长江口水文 动力的特征,本实验设计三级动力扰动,分别在 (100 ± 5)、(140 ± 50)、(210 ± 5) r·min⁻¹扰动下 进行实验.

1.2.2 再悬浮实验室模拟方法

同时取2根柱样,分别采集各层再悬浮实验前 沉积样,分层间隔按先密后疏原则设置.用分样刀分 取上部 10 cm 柱样于相同管径的有机玻璃柱中.再 向其加入约12 cm 柱高的潮滩上覆水(约1.4 L)后 静置过夜以平衡柱样.调节电机转速在 97.0~ 110.0 r·min⁻¹,并迅速在开启之始,从2个对比柱样 中,分别取出100 mL水并随即重新加入上覆水以保 持原水位.实验时,现场监测柱样中上覆水的 pH、 Eh、DO、温度变化.一定时间间隔后,重复上述过 程. 间隔时间分别设置为 3 个 10 min、4 个 30 min. 一级扰动实验结束后,再分别进行二级、三级扰动 动力实验. 取出的 100 mL 上覆水用 0.45 μm 孔径 的玻璃纤维滤膜进行过滤,加入2 mL HNO。后移入 塑料瓶中冷冻保存.滤膜烘干、冷却称重后封入自 封袋中冷冻保存.全部实验结束后取出有机玻璃柱 中的沉积物柱样,柱样分层及模拟实验后土样采集、 处理方法同上.

每次再悬浮实验均设置2个对比或平行柱样同时进行实验.并且每种上覆水盐度条件下(除 13.0%。盐度条件下)都分别进行中潮滩、低潮滩的 对比实验.根据现场监测到长江口上覆水盐度为 10.0%。,中、低潮滩柱样平均盐度分别为4.3%。、 10.2%。,实验方案设计见表1.

1.3 分析方法

移取 10 mL 过滤水样于 25 mL 比色管中,加入 1 mL 新制 BrCl 后静置 1~2 h. 滴入 2 滴 1% 盐酸羟 胺溶液以使溶液褪色,用超纯水定容,上机测试. 沉 积物样品则经 CHRIST Alpha1-4 冷冻干燥机冷冻干 燥后研磨过 240 目尼龙筛待用. 称取约 0.2 g 沉积 样于 50 mL 比色管中,加入 5 mL 超纯水和 5 mL 新 制王水. 充分混匀后静置过夜,进行冷消解. 将比色 管放于 95℃恒温水浴箱中水浴加热 2 h,冷却后用

表1 实验方案设计表								
Table 1 Design of experiment project								
实验柱样	M0 与 M1	LO与L1	L2 与 M2	L3 与 M3	L6 与 L7	L4 与 L5	M4 与 M5	M6 与 M7
盐度/‰	10.0	10.0	4.1	4.1	13.0	8.0	8.0	8.0

超纯水定容至 50 mL. 再静置过夜使溶液澄清后上 机测试. 将称重后的滤膜进行消解测定颗粒物中的 总汞含量,其消解与测定方法同沉积物一致.

实验中,pH和Eh参数测定使用IQ150pH/mV Dual Technology 仪,DO参数测定使用YSI55 溶氧 仪,颗粒物与沉积物粒度使用LS13320激光粒度仪 测定.水样和沉积物、颗粒物中的总汞含量均经相 应预处理后使用北京吉天AFS-9230 双道原子荧光 光度计测定.为保证数据准确性,每组实验均设定3 ~5个空白实验、平行样品和标准样品的测定.回 收实验中,水样测定使用模拟天然水汞溶液成分分 析标准样品GBW(E)080392,沉积物与颗粒物测定 使用长江口水系沉积物标准物质GBW07309(GSD-9).测定结果表明,所有平行样品的R.S.D.控制在 10%以下,汞标准物质(GSD-9)回收率控制在 96.0%~108.2%之间,模拟天然水标准物质回收率 控制在 92.1%~109.7%之间,符合实验要求.

2 结果与分析

2.1 再悬浮实验前后沉积物柱样变化特征

2.1.1 有机质和粒度变化特征

分析原始柱样,中、低潮滩沉积物粒度组成均 是黏粒、粉粒为主.但低潮滩沉积物粘粒比重要大 于中潮滩.低潮滩柱样各层平均粒径主要分布在8 ~15 μm 的范围内,而中潮滩柱样各层平均粒径明 显较低潮滩高,主要分布在18~33 μm 之间.以L2 与 M6 柱样为例,低潮滩所有分层中颗粒粒径76% ~86.5%分布在16 μm 以下,而在同样分级上,中 潮滩则只有44.8%~58.7%.发生再悬浮后,低潮 滩仍以黏粒和细粉砂为主,中潮滩则各粒级上分布 比较均匀,砂粒比重较大.而在表层0~3 cm,以上 趋势更为明显.

对于原始柱样沉积物有机质(见图 2),中潮滩 TOC 含量要明显低于低潮滩.低潮滩柱样中有机质 含量一般在 12 ~ 23 g·kg⁻¹之间,均值为 17.9 g·kg⁻¹,且随深度有机质较少较为明显;中潮滩柱 样中有机质含量一般在 5 ~ 11 g·kg⁻¹之间,均值为 9.4 g·kg⁻¹,且随深度增加有机质含量的减少不明 显.发生再悬浮后,中潮滩和低潮滩的沉积物柱样中 的有机质变化并不大.中潮滩有机质从2~3 cm 层向下较再悬浮之前出现降低.有机质变化与上覆水体盐度也有关系,在盐度为13.0% 的上覆水中,中潮滩柱样各层均出现有机质的降低.



图 2 典型柱样模拟前后有机质变化曲线 Fig. 2 Changes of organic matter concentration of L3&M4 core before and after simulation

2.1.2 沉积物柱样 Hg 含量变化特征

分析原始沉积物柱样,低潮滩总汞含量平均值 较中潮滩略高.中、低潮滩沉积物总汞含量集中在 0.100~0.259 μg·g⁻¹范围内.以 M2、L2 柱样为例, L2 柱样中汞含量明显比 M2 要高:L2、M2 汞平均含 量分别为 0.243 μg·g⁻¹、0.125 μg·g⁻¹.

在上覆水盐度为 4.1% 8.0% 、13.0% 条件 下,发生再悬浮发生后,中、低潮滩 Hg 含量变化特 征较为相似(见图 3).盐度为 4.1% 上覆水体中低 潮滩 0~7 cm 分层总体上都表现出汞降低,中潮滩 则在 0~5 cm 分层表现出汞升高.在 8.0% 盐度上 覆水下,低潮滩仍是表现出较为明显的汞降低,而中 潮滩则是在各分层中汞含量出现升高或是微小降 低.在 13.0% 盐度条件下,低潮滩汞含量相较再悬 浮发生.而盐度为 10.0% 上覆水条件明显改变了再 悬浮过程中汞含量变化特征.在盐度为 10.0% 上覆 水条件下,在 0~4 cm 分层上,低潮滩表现出汞含量 较高升高,中潮滩则表现出汞含量较高降低,在 4~ 7 cm 分层上出现相反的规律,即低潮滩汞含量降 低,中潮滩汞含量增加.



图 3 不同盐度下中低潮滩柱样汞含量 Fig. 3 Mercury concentration in medium and low tidal flat core in different salinity conditions

2.2 再悬浮过程中上覆水各基本参数变化特征

在再悬浮过程中,上覆水体中 pH、Eh、DO、 TSS等基本参数均发生了剧烈的变化(见图 4).水 温 t 也有变化,但并不剧烈.在每一级动力扰动发生 后,DO、TSS 会迅速上升,pH 会迅速下降.在变动后 不久,DO 出现短时的下降之后会稳定在某一水平 上;而 pH 则会迅速上升并最终会从7.55~7.90上 升至 8.00~8.20.在整个再悬浮过程中,水体中的 pH 基本呈上升趋势.而 Eh 变化特征则与 pH 相反, 两者表现出明显的负相关,相关系数可达 -0.992 (*P* < 0.01).TSS 迅速上升后,会缓慢下降.总体上, 一、二级扰动对 TSS 的影响要远小于三级扰动,TSS 呈不等距梯级变化且其变化与扰动动力显著相关, 相关系数达 0.902(*P* < 0.01). 水温 *t* 则呈缓慢上升的趋势,升温幅度在 1.4~2.9℃之间.

DO、pH、Eh、TSS 剧烈变化的可能原因是:在 扰动发生后水体曝气会使 DO 升高同时沉积物会进 入水体使 TSS 增加,这部分沉积物含有大量硫化物、 腐植酸等能使得 pH 迅速下降.随后再悬浮到水体 的物质发生快速的耗氧,DO 开始降低.而随酸性物 质被复氧氧化,碱性物质开始占上风,pH 开始上升. 颗粒物会迅速重新沉降,于是 TSS 也开始降低.随着 扰动动力的提高,产生的剪应力会使新的沉积物发 生悬浮进入水体,上述过程才会多次发生.而上覆水 水温的缓慢上升则可能是由于水体持续扰动获得能 量所致. DO/mg·L⁻¹





2.3 再悬浮过程中上覆水溶解态汞、颗粒态汞、 总汞变化特征

2.3.1 上覆水中溶解态汞(HgD)变化特征

从上覆水溶解态汞浓度数据分析(图5)可以看 出,上覆水中溶解态汞浓度多数处在0.152~2.657

µg·L⁻¹范围内. 在每一级扰动开始后初期 10~20 min 水体中汞浓度迅速降低. 之后随扰动时间延长, 汞浓度又会重新升高. 总体上, 在发生再悬浮 30 min 后,溶解态汞浓度波动比扰动初期波动较低.在上覆 水盐度为 8.0‰、10.0‰条件下,中潮滩与低潮滩的 再悬浮过程中,溶解态汞含量变化趋势基本相同.而 在盐度为4.1‰条件下,中潮滩发生吸附与解吸的 过程剧烈;低潮滩则表现平缓,降低之后的溶解态 汞未有明显的升高趋势.不同动力扰动对上覆水盐 度为4.1%%、8.0%%、10.0%%条件下的中低潮滩溶解 态汞变化影响较小,但会对盐度为13.0‰条件下的 低潮滩溶解态汞变化产生较大影响.一级扰动下的 溶解态汞变化要明显小于二级扰动,三级扰动则最 高.在再悬浮过程中溶解态汞变化的原因可能是:在 每一级扰动初期,剪切进入上覆水中的颗粒物会迅 速吸附水体中原存在的溶解态汞,使其中的溶解态 汞迅速降低. 而在再悬浮发生 30 min 后, 随再悬浮 起来的硫化物等不断氧化等过程, 汞会重新释放出 来,这个解吸过程相对于吸附过程较为缓慢.



不同盐度条件下中低潮滩柱样上覆水中溶解态汞含量 图 5 Fig. 5 Mercury Dissolved concentration of in the overlying water in different salinity conditions

2.3.2 上覆水中颗粒态汞(HgP)变化特征 从上覆水中颗粒态汞含量数据分析(图6)可看

出,覆水中颗粒态汞含量多数处在 0.080~2.722 μg·g⁻¹范围内. 总体上,在扰动发生之初颗粒态汞含

量会较快上升,随后迅速降低,并在降低到一定程度 后在某一水平上下波动.在上覆水盐度为4.1%。条 件下,低潮滩颗粒态汞变化远比中潮滩活跃,表明其 吸附、解吸变动剧烈.在盐度为8.0%。条件下,中潮 滩与低潮滩颗粒态汞除最初略有上升及随后的下降 之后变化趋势相反,但中、低潮滩颗粒态汞的活跃 性基本一致.在盐度为10.0%。条件下,低潮滩颗粒 态汞含量变化仍比中潮滩变化活跃.但与其他盐度 条件下不同的是,在扰动初期颗粒态汞迅速下降之 后仍缓慢降低.在盐度为10.0%。、13.0%。条件下,一 级扰动对颗粒态汞的影响要明显大于二三级扰动. 总起来看,在再悬浮过程中,颗粒态汞多在扰动动力 发生变化初期迅速下降,且低潮滩颗粒态汞活跃性 要高于中潮滩.但不同盐度、扰动条件下,颗粒态汞 含量变化趋势差异较大.上覆水中颗粒态汞的变化 可能是因为:在扰动发生初期,沉积物进入上覆水使 其中的 TSS 增大并吸附溶解态汞使得颗粒态汞的含 量升高;随后,由于硫化物氧化等及沉积物重新沉 降,上覆水中颗粒态汞迅速降低.及至上覆水中吸 附、解吸与沉降、扰动达到平衡后,颗粒态汞会在 某一水平上下波动.而盐度与底质条件会影响平衡 过程,所以才出现不同盐度、扰动动力条件下不同 底质沉积物颗粒态汞变化特征差异较大的情形. 2.3.3 上覆水中总汞(THg)变化特征





上覆水中总汞含量能直接反映上覆水体与沉积物的交互作用,含量增高表明再悬浮过程使汞从沉积物中进入上覆水,降低则反之.从上覆水中总汞含量数据分析,每级扰动之初上覆水中总汞迅速降低,随后缓慢上升之后又会略有降低.在上覆水盐度为4.1%。条件下,中低潮滩上覆水总汞除最初变动相反外,两者变化特征基本相同.再悬浮后相较再悬浮发生前水体总汞含量不但没有升高,反而出现微小的降低.在盐度为4.1%。、10.0%。、13.0%。条件下,扰

动动力变化对总汞变化贡献较小,并未有明显的总 汞变化特征的改变.在盐度为8.0‰条件下,三级扰 动对总汞变化的影响要高于一二级扰动.总体上看 总汞在再悬浮过程中变化剧烈、复杂,表明在再悬 浮过程中,水-颗粒物-沉积物三者界面发生了复杂 的吸附-解吸、悬浮-沉降过程.

3 讨论

3.1 上覆水体中溶解态与颗粒态分配系数变化特征

从上覆水溶解态与颗粒态 Hg 分配系数(颗粒态汞含量/溶解态汞浓度)变化曲线(图7)分析可知:中潮滩汞分配系数一般都在1以下,且变化幅度 也较小.而低潮滩分配系数变化剧烈,往往能在0~ 25之间变化.表明低潮滩都发生复杂的解吸-吸附 作用,且中潮滩一直是溶解态占优势,而低潮滩是颗 粒态占优势.上覆水盐度为4.1%。条件下的分配系 数变化幅度又大于盐度为10.0%。下的变化幅度.在 上覆水盐度为4.1%。、10.0%。、13.0%。条件下,三级 扰动所造成的分配系数波动要明显小于一、二级扰 动.在上覆水盐度为8.0%。条件下,扰动动力对分配 系数变化影响较小. 且除在二级扰动之始波动剧烈 外,每级扰动均会使分配系数在1左右变动. 上覆水 Hg分配系数变化的可能原因是:低潮滩含有较多粘 粒且 TOC 较高,对汞具有较强的吸附能力. 较多的 汞被吸附在颗粒物上,使得颗粒态汞为其主要形态. 在再悬浮过程中,随着颗粒物的悬浮和沉降进出上 覆水,并在颗粒物表面发生新的吸附解吸行为. 在这 个过程中,盐度与基本参数变化会对吸附解吸产生 影响,所以表现出不同上覆水盐度条件下不同的分 配系数变化. 而中潮滩柱样中砂粒较多、TOC 较小, 汞易被解吸出来,溶解态汞占优势.



图 7 不同盐度条件下上覆水中汞分配系数 Fig. 7 Partition coefficient of mercury in overlying water in different salinity conditions

3.2 再悬浮过程中 Hg 的释放特征

对上覆水 pH、Eh、DO、TSS 等与颗粒态汞、溶 解态汞、总汞等数据进行相关性分析,得出其相关 系数均小于 0.5,表明单个参数并没有直接与水体 中汞浓度相关,各种参数综合起来对再悬浮汞释放 发生作用.在再悬浮过程中水温的缓慢上升也是汞 解吸的部分原因.在再悬浮过程中,沉积物中汞通过 动力扰动破坏表面稳定性进入上覆水,而上覆水中 的汞主要通过颗粒物的沉降重新进入沉积物.在上 覆水中,汞在颗粒态与溶解态之间不断转换是通过 发生在颗粒物-上覆水界面的吸附-解吸实现的. 扰 动动力能影响悬浮-沉降过程,动力增大会使更多的 颗粒物悬浮进入上覆水; 盐度与基本参数条件则能 影响吸附-解吸过程. 一般情况下,颗粒物对重金属 离子的吸附能力会随 pH 值的升高而增加, pH 降低 产生 H⁺的竞争作用会增加金属离子的解吸量. 而 碱金属和碱土金属离子可将吸附在固体颗粒上的金 属离子交换出来使得盐度的增加会大大增强重金属 的解吸^[27].

基本参数的变化特征表明,在扰动初期存在初

期剪切效应. 扰动之初沉积物进入水体,使得基本参数与各种形态汞含量发生变化. TSS 增大,颗粒物对汞的吸附作用会使上覆水颗粒态汞增高而使溶解态汞降低. pH 升高、Eh 降低、t 升高会加成吸附作用,使颗粒物的吸附能力增加^[28].随后由于水体环境发生重要的变化,沉积物中的还原物质被氧化及沉积物再沉降,基本参数与各种形态汞重新变化,在这个过程中汞不断发生吸附、解吸在颗粒物与上覆水相之间迁移,最终达到某一平衡. 在水环境各种参数的变化下,汞在各界面不断进行分配,汞由颗粒态进入溶解态并最终导致了汞的释放.

4 结论

(1)在每一级扰动发生后,pH、Eh、DO、t、TSS 等基本参数都会发生巨大的变化,之后又会反方向 呈缓慢变化趋势.各种参数的变化表征了在再悬浮 过程中,上覆水体环境发生了巨大变化.对上覆水 pH、Eh、DO、TSS等与颗粒态汞、溶解态汞、总汞 等数据进行相关性分析,相关性均小于 0.5,这表明 单个参数变化并没有直接与水体中汞浓度变化相 关,而是各种参数综合起来对再悬浮过程中汞释放 发生作用.

(2)再悬浮作用使得盐度为4.1‰、8.0‰、
10.0‰、13.0‰条件下的中潮滩及盐度为13.0‰条件下的低潮滩都发生了汞释放,释放的汞含量为
0.053~0.673 μg·g⁻¹,但对盐度为4.1‰、8.0‰、
10.0‰条件下的低潮滩汞释放影响并不明显.

(3) 再悬浮作用对长江口中、低潮滩的 Hg 释放影响也有差异. 再悬浮对于低潮滩的影响比对中 潮滩的影响大,中潮滩表现出了比低潮滩要明显的 汞释放.

(4) 扰动动力对汞释放具有重要影响, 扰动动力的加大能对汞在水-颗粒物界面上的吸附-解吸平衡产生作用. 当扰动动力为(210±5) r·min⁻¹时能明显增加汞的解吸, 从而对汞释放产生影响. 参考文献:

- [1] 廖自基.环境中微量重金属元素的污染危害与迁移转化
 [M].北京:科学出版社, 1989.
- [2] 沈军.物理扰动再悬浮作用下长江口近岸水体中汞的迁移与转化[D].上海:华东师范大学,2009.
- [3] 王起超,刘汝海,吕宪国,等.湿地汞环境过程研究进展[J].
 地球科学进展,2002,17(6):112-117.
- [4] 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: 1824-1831.

- [5] 李占海,陈沈良,张国安,等.长江口崇明东滩水域悬沙粒径 组成和再悬浮作用特征[J].海洋学报,2008,30(6):154-163.
- [6] Kim E H, Mason K E, Porter R P, et al. The effect of resuspension on the fate of total mercury and methyl mercury in a shallow estuarine ecosystem: A mesocosm study [J]. Marine Chemistry, 2004,86: 121-137.
- [7] Van den Berg G, Meijers G, Van der Heijdt L, et al. Dredgingrelated mobilization of trace metals: a case study in The Netherlands[J]. Water Research, 2001, 35: 1979-1986.
- [8] Saulnier I, Mucci A. Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments, Saguenay Fjord, Canada
 [J]. Applied Geochemistry, 2000, 15: 191-210.
- [9] Yang Z F, Feng J J, Niu J F, et al. Remobization of polycyclic aromatic hydrocarbons during the resuspension of Yangtze River sediments using a particle entrainment simulator [J]. Environmental Pollution, 2007, 149: 193-200.
- [10] Jing Y D, He Z L, Yang X E. Effects of pH, organic acids, and competitive cations on mercury desorption in soils [J]. Chemosphere, 2007,69: 1662-1669.
- [11] 钱嫦萍,陈振楼,胡玲珍,等.崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J].环境科学,2003,24
 (5):114-119.
- [12] Sanei H, Goodarzi F. Relationship between organic matter and mercury in recent lake sediment: The physical-geochemical aspects[J]. Applied Geochemistry, 2006, 21: 1900-1912.
- [13] 成凌,程和琴,杜金洲,等.长江口底沙再悬浮对重金属迁移 的影响[J].海洋环境科学,2007,26(4):317-320.
- [14] Atkinson C A, Jolley D F, Simpson L S. 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: 1428-1437.
- [15] 毕春娟,陈振楼,沈军,等.再悬浮作用下长江河口沉积物中 Hg的迁移与释放[J].环境科学,2009,30(11):3256-3261.
- [16] Bengtsson G, Picado F. Mercury sorption to sediments: Dependence on grain size, dissolved organic carbon, and suspended bacteria[J]. Chemosphere, 2008,73: 526-531.
- [17] Dovalle C M, Santana G P, Windmöler C C. Mercury conversion processes in Amazon soils evaluated by thermo desorption analysis
 [J]. Chemosphere, 2006,65: 1966-1975.
- [18] Martino M, Turner A, Nimmo M, et al. Resuspension, reactivity and recycling of trace metals in the Mersey Estuary, UK [J]. Marine Chemistry, 2002,77: 171-186.
- [19] 宋连环,郑祥民,周立旻,等.崇明东滩湿地沉积物中汞累积 特征及其影响因素研究[J].环境科学研究,2009,22(12): 1426-1432.
- [20] 翟万林,龙江平.沉积物重金属污染评价方法对比——以上 海崇明东滩为例[J].贵阳学院学报(自然科学版),2010,5 (3):20-25.
- [21] Tsai C H, Lick W. A portable device for measuring sediment resuspension[J]. Great Lakes Research, 1986,12: 314-321.

- [22] Cantwell M G, Burgess R M, Kester D R. Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension [J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36: 5328-5334.
- [23] Cantwell M G, Burgess R M. Variability of parameters measured during the resuspension of sediments with a particle entrainment simulator[J]. Chemosphere, 2004, 56: 51-58.
- [24] Robert E K, Elka P M, Soulen H L, et al. The impact of resuspension on sediment mercury dynamics, and methylmercury production and fate: A mesocosm study[J]. Marine Chemistry, 2006,102: 300-315.
- [25] 冯精兰, 沈珍瑶, 牛军峰, 等. 再悬浮持续时间对沉积物中 PAHs释放的影响[J]. 科学通报, 2008, 53(9): 1045-1050.
- [26] Kalnejais L H, Martin W R, Signell R P, et al. Role of sediment resuspension in the remobilization of particulate-phase metals from coastal sediments [J]. Environmental Science& Technology, 2007,41: 2282-2288.
- [27] 赵健,毕春娟,陈振楼,等.动力和盐度影响下长江口近岸沉积物中汞的再悬浮行为[J].中国科学:化学,2010,40(1):
 1-12.
- [28] 吴吉春,张景飞,孙媛媛,等.水环境化学[M].北京:中国水 利水电出版社,2009.