

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

钱嫦萍, 陈振楼, 胡玲珍, 邓焕广 (华东师范大学地理信息教育部重点实验室, 上海 200062)

摘要: 2002年7月采集崇明东滩低潮滩沉积物样和水样, 运用模拟实验研究沉积物再悬浮作用对沉积物-水界面三态氮和可溶磷交换行为的影响。实验发现, 在沉积物不断发生再悬浮的过程中, 水体中三态氮的含量明显增加, 其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化最为显著, 升高浓度值达 $11.869 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 增长 $2.1713 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的释放约为 $0.2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 可溶磷的含量也有少量的增加。同时, 再悬浮作用对沉积物-水界面三态氮和可溶磷的环境地球化学行为也有一定的影响, 与静置状态相比, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 表现出与静置状态截然相反的变化规律, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 受多种因素的影响, 变化比较复杂, 初期与静置状态相反而后表现一致。再悬浮颗粒物浓度也是制约沉积物-水界面三态氮和可溶磷变化的主要因子之一。实验结果显示, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在前7h以内的变化和悬浮颗粒物浓度表现出较好的相关关系, 后5h呈负相关关系; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和可溶磷在整个过程中与悬浮颗粒物浓度的变化都有着很好的相关性, 只有 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化与其关系比较薄弱。

关键词: 再悬浮; 沉积物; 沉积物-水界面; 氮; 磷; 崇明东滩

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2003)05-06-0114

Effects of Sediment Resuspension on Nitrogen and Phosphate Exchange at the Sediment-Water Interface in East Chongming Tidal Flat

Qian Changping, Chen Zhenlou, Hu Lingzhen, Deng Huanguang (Key Laboratory of Geographical Information Science, the Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: Sampling sediment and water to mimic sediment resuspension and researching its effects on nitrogen and phosphate exchange at the sediment-water interface in east Chongming tidal flat. Through the experiment, it was found that sediment resuspension causes $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and DIP releases. The release of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ is most marked, the increasing concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and DIP reach in turns: $11.869 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $2.1713 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.02 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$. At the same time, resuspension also change nitrogen and phosphate exchange at the sediment-water interface compare to without resuspension to great extent. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ have absolutely opposite diversification with and without resuspension; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ shows complicated transformation because of many effected elements. The result of the experiment display the changes of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and DIP concentration in water have good relation to $\text{SPM}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$, this relation have not appear in change of $\text{NO}_2^- - \text{N}$.

Key words: resuspension; sediment; sediment-water; nitrogen; phosphate; East Chongming Tidal Flat

随着城市化、工业化以及农业现代化的不断发展, 全球大部分的河、湖和海洋中营养盐、重金属、杀虫剂、PCBs、PAHs 以及其他有害化学元素含量急剧上升^[1]。由于河、湖和海洋的沉积作用, 水底沉积物理所当然成为这些污染物的最终归属^[2]。而这些被污染的沉积物在水动力条件(潮汐、风、波浪、地震、航运、疏浚工程等)和生物扰动作用(底栖、钻孔等)下又可被扬起发生再悬浮, 吸附在悬浮沉积物上的污染物

质由无氧环境进入有氧环境中将会被再一次释放出来, 对水环境造成二次污染。已污染沉积物的再悬浮已被确认为是有有机污染物(PAHs, PCBs 和类醇)、放射性元素、一些微量金属元素

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40131020); 国家自然科学基金资助项目(40173030); 国家教育部骨干教师计划资助项目; 上海市青年科技启明星跟踪计划项目(01QM1406)

作者简介: 钱嫦萍(1977~), 女, 硕士研究生, 主要从事潮滩沉积物生物地球化学和滨岸悬浮颗粒物研究。

收稿日期: 2003-01-11; 修订日期: 2003-02-17

以及营养盐等迁移和输送的一个重要过程^[1,3~7].Federico 研究得出沉积物的再悬浮促进了磷酸盐通过表面吸附以及磷灰石的溶解进行释放,其释放量和悬浮颗粒物含量呈正比;同时,随着再悬浮过程的加剧,更多的有氧环境使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 迅速转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ^[1].另外,伴随再悬浮作用而来的有利氧化条件对沉积物-水界面上铁的氧化膜的形成非常有利,而这种氧化膜会促进磷酸盐由沉积物向水体中扩散^[5].Morin 和 Morse 根据实验模拟结果证实河口沉积物再悬浮过程中可释放大量氨氮,其量级接近沉积物-水界面氨氮的扩散通量^[8].Tomoko 和 Reimers 研究 Hudson 河-海交界区沉积物再悬浮下颗粒态有机碳与可溶态有机碳的转化时发现再悬浮的沉积物是本区水体中可溶态有机碳的一个源,由于强烈的解析作用导致颗粒态有机碳转化为可溶态有机碳释放进入水体^[9].可见,在评价沉积物对水生生态系统和人类利用这些资源的潜在危害性时,对沉积物再悬浮作用的研究尤为重要.

近几十年来随着长江流域经济的发展,长江上游来水 N、P 含量逐年增加^[10],而上海是我国经济最发达城市,随着经济的飞速发展和人口压力的不断增加,工业废水和生活污水量不断上涨,排污口排出的污水中污染物以及长江上游来水携带污染物在长江口受潮汐影响回荡,随泥沙沉降,相当一部分堆积在崇明东滩.当沉积物发生再悬浮作用时,累积在沉积物中的污染物质的释放对上覆水体环境将有着巨大的影响,本文研究的主要目的是:①模拟沉积物夹带装置在沉积物再悬浮中的应用;②沉积物再悬浮对沉积物-水界面营养盐交换的影响;③为崇明东滩整个生态环境系统的保护和管理提供科学的依据.

1 采样和方法

1.1 采样区位特征

崇明东滩由东面的东旺沙和东南面的团结沙组成,滩地宽达 11 km,平均高潮位以上的滩坡为 0.2%,平均高潮位以下的滩坡为 0.6%,滩地淤涨迅速,平均每年向海推进 300 m 左右,本研究采样断面位于崇明东滩东旺沙的延伸数 km 长的受潮汐影响最大且受潮流冲刷最强的光滩带即低潮滩(图 1).本区沉积物主要以粉砂质为主,其平均粒径为 66.4 μm ,粘土的含量只有 44.0%,由于采样点位于整个东旺沙的南部,所以盐度较小,只有 0.2 ‰(具体参数见表 1).

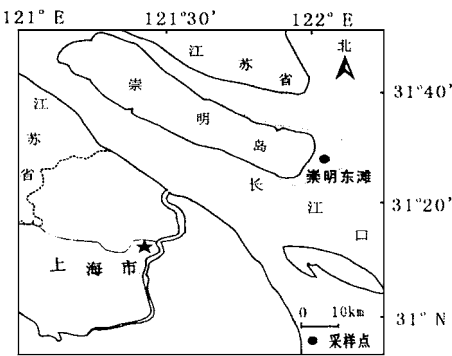


图 1 研究区域和采样点

Fig.1 Sketch map of sampling site

1.2 样品的采集

采样工作于 2002 年 7 月进行,在低潮滩用塑料小铲采集 0~5 cm 深度的表层沉积物 3 个平行样品,放入可自动密封的聚乙烯塑料袋中,混合均匀,同时用有机玻璃自制的采水器采集上覆水样 25 L,装入 25 L 的塑料大桶中.样品采集后立即运回实验室进行模拟实验.同时测定现场温度、电导、盐度、溶解氧、电位、pH 等环境因子(如表 1).

1.3 实验室模拟

将采集的表层沉积物 3 个平行样置于 3 个

表 1 2002 年 7 月崇明东滩低潮滩水和沉积物实测的参数

Table 1 The measured geochemical parameters of tidal water and sediments in east Chongming tidal flat (2002-07)

温度 / $^{\circ}\text{C}$	盐度 / ‰	电导率 / μS	溶解氧 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH	Eh	沉积物的干重 / %	平均粒径 / μm	中值粒径 / μm	粘土的体积分数 / %
31.1 $^{\circ}\text{C}$	0.2	469.0	7.08	8.02	183	75.1	66.4	67.0	44.0

内径为 127 mm、高 280 mm 的有机玻璃管中(如图 2 所示),并小心注入当地上覆水样 1.6 L(用一个内底侧打通的聚乙烯瓶作缓冲以避免表层被扰动),其中沉积物样深为 100 mm,上覆水样深 127 mm,取样点距沉积物面 30 mm(如图 2),以充分反映界面的交换情况.利用 90 YY60/ JB 齿轮减速单相电容运转异步电动机带动圆盘(有机玻璃,其大小形态见图 2)上下振动,振动范围选择为 100 ~ 300 r/ min,档次分 4 档:150 ± 5 r/ min、200 ± 5 r/ min、250 ± 5 r/ min 和 295 ± 5

r/ min,取样时间间隔分别为:0(调速到 1 档)、5(调速到 2 档)、15、30、60(调速到 3 档)、120、180(调速到 4 档)、300 min,每次用医用注射器取样 50 mL,所取水样均经孔径为 0.45 μm 的微孔滤膜过滤,置于 50 mL 塑料瓶中,并加入 2 滴 HgCl₂,冷冻保存,带有悬浮颗粒物的滤膜用于悬浮颗粒物含量测定;同时设置一个控制样和空白样,其中控制样为沉积物和水样静置状态,空白样为无沉积物状况下进行振动,取样和模拟实验同步进行.

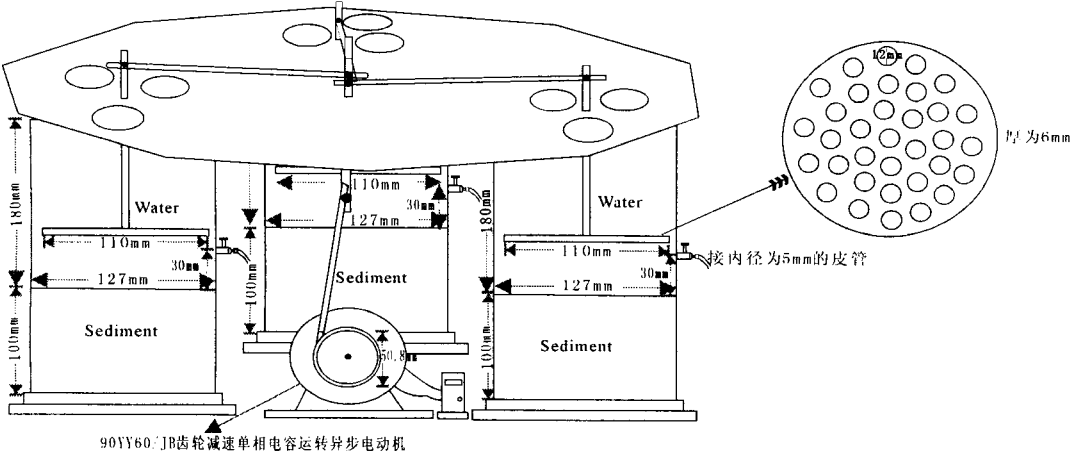


图 2 沉积物再悬浮实验模拟装置

Fig.2 Simulation device of sediment resuspension experiment

1.4 分析方法^[11]

用烘干法和干烧法分别测沉积物样品的含水率和有机质含量;硝酸盐氮(NO₃⁻-N)用锌-镉还原法测定,亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)用磺胺和盐酸萘乙二胺试剂法测定,氨氮(NH₄⁺-N)用次溴酸钠氧化法测定,可溶态无机磷(DIP)用抗坏血酸为还原剂的磷钼蓝法测定;悬浮颗粒物含量用滤膜法获得.实验分析误差小于 ± 5 %.空白样中各指标在整个过程中的微小变化对整个实验的影响可忽略不计.

2 结果与讨论

2.1 静置状态下水体中三态氮和可溶磷含量的变化

崇明东滩无机氮以 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 为主,其含量变化范围分别为: 6.392 ~ 14.947 μmol · L⁻¹, 45.82 ~ 69.708 μmol · L⁻¹(如

表 2); NO₂⁻-N 含量很低,浓度只有 1.331 μmol · L⁻¹左右.由图 3d 可以看出,静置状态下沉积物-水界面水体中 NH₄⁺-N 浓度总体呈增长趋势,显示出整个培养过程中由沉积物向水体中释放,在培养初始阶段 0 ~ 5 min 内发生一次较小量的释放,其释放量只有 1.815 μmol · L⁻¹,这可能和崇明东滩本身沉积物中 NH₄⁺-N 含量就比水体中 NH₄⁺-N 含量高有关;同时,由图 3c 可以看出,在最初的 5 min 内,水体中大量 NO₃⁻-N 进入沉积物中, NH₄⁺-N 溶出也有可能是 NO₃⁻-N 的还原速率超过了其反硝化的速率,导致一部分 NO₃⁻-N 被直接还原为 NH₄⁺-N,从而进入上覆水体.5 min 后水体中 NH₄⁺-N 急剧下降,表现为由上覆水进入沉积物中,经过短暂的 15 min 后, NH₄⁺-N 又一次大量地释放进入水体,持续时间约为 80 min,之后水体中 NH₄⁺-N 的含量经

过缓慢减少后,在培养到第 7h 开始释放并达到最大浓度. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 这种复杂的变化主要和沉积物中有机质的降解和间隙水中营养盐的分子扩散作用等有关. 由于 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 是 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之间的一个中间产物, 所以其变化受多种因素和过程的影响, 但是, 在静置状态下表现出和 NH_4^+ 的变化规律一致. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的含量在 5 ~ 20 min 内表现出较大的释放后迅速降低, 在 7h 以后几乎达到平衡, 这和 Scarlatos 刘素美等的研究结果基本一致^[1,12]. DIP 含量很低, 其范围

只有 $0.396 \sim 0.963 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, P 作为海域初级

表 2 静置状态下沉积物-水界面三态氮和可溶磷
随时间的变化/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Temporal variability of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, DIP at the sediment-water interface in action less state				
时间/min	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	可溶态磷(DIP)
0	7.429	1.331	69.708	0.837
5	9.243	1.477	52.250	0.963
20	3.280	1.149	66.033	0.899
50	9.243	1.331	66.952	0.711
110	11.058	1.513	56.844	0.899
230	10.540	1.404	56.844	0.967
410	6.392	1.368	53.169	0.648
710	14.947	1.951	45.818	0.397

生产力的控制因子之一,受多种因素的影响,在整个培育过程中是由水体进入沉积物的,沉积物表现出是磷酸盐的一个汇.

2.2 再悬浮作用对沉积物-水界面三态氮和 DIP 交换行为的影响

在再悬浮整个培育过程中,上覆水体中三态氮和 DIP 的含量明显上升,其中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 变化最为明显,如图 3c 所示, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在振荡状态过程中各个时刻的含量均高于静置状态的含量,在静置状态下上覆水体中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 平均浓度只有 $58.452 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 振荡后平均浓度达到 $70.321 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 沉积物向水体中释放的 NO_3^- 达到 $11.869 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 达到 $2.1713 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的释放约为 $0.2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, DIP 的含量也有少量的增加. 沉积物向水体释放无机 N 在振荡初期表现最为明显,这主要是因为表层沉积物孔隙水和上覆水体发生混合,无机 N 快速向上覆水体扩散的缘故^[13]; 沉积物的再悬浮不仅导致了沉积物中三态氮大量的释放,同时也改变了整个沉积物-水界面三态氮和 P 的交换行为.

(1) $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 交换行为的变化 由图 3d 可知,在

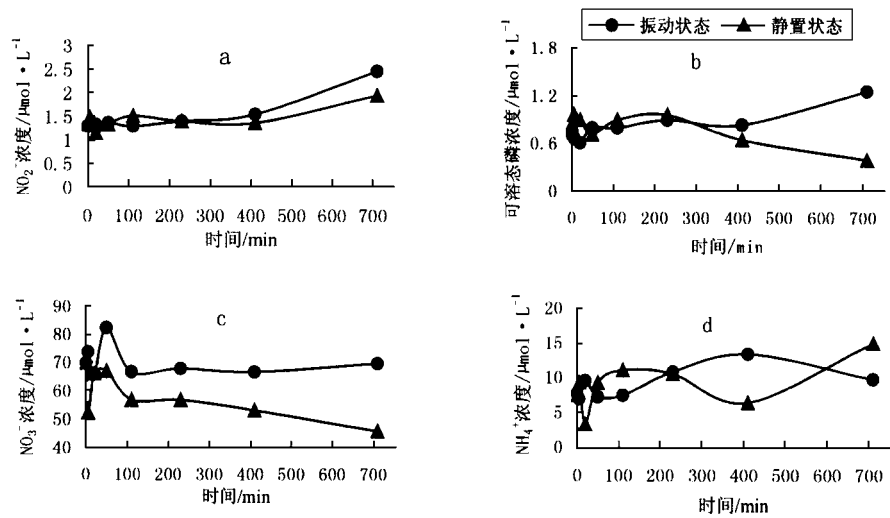


图 3 2 种不同状态下沉积物-水界面 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, DIP 含量变化状况

Fig. 3 Diversification of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and DIP at the sediment-water interface in two different state

整个振荡过程中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的变化和静置状态下的变化出现了完全相反的规律,在沉积物不断

发生再悬浮的过程中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的重要释放主要出现在 2h 后, 这和 Morin 的研究^[7]是一致的;

释放进行到 410 min 时达到最大,释放量为 $6.97\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.随着振动强度的加剧,水体中 NH_4^+-N 的含量开始出现下降,这主要是因为扰动强度的加大导致更多底层沉积物进入有氧环境中,硝化作用加强,反硝化作用减弱,同时,有氧环境的产生使得有机质的降解也会消耗大量的 NH_4^+-N ,使其部分转化为 NO_3^--N ^[7,14].由图 4a 还可以看出, NH_4^+-N 在初始阶段的变化和再悬浮颗粒物浓度有着较好的相关性,当振荡速度达到最大,悬浮颗粒物浓度发生急剧上升的情况下,水体中 NH_4^+-N 含量也大量地减少,表现出和悬浮颗粒物含量 (SPM) 的负相关性,这和 Morin 和 Morse 在研究沉积物再悬浮快速释放 NH_4^+-N 和加入沉积物数量关系具有一致的规律^[7].

(2) $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 交换行为的变化 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作

为 NH_4^+-N 与 NO_3^--N 转化的中间产物,其变化受多种因素和过程的控制,所以在整个过程中变化比较复杂.如图 3a 所示,在最初的 230 min 之内,振荡状态下 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的变化和静置状态下的变化完全相反,但之后却又表现出一致的规律.实验发现,水体中的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在整个振荡过程中的变化和悬浮颗粒物的浓度变化有着很好的相关关系(如图 4b).

(3) $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 交换行为的变化 在整个再悬浮过程中,沉积物向上覆水体释放最大的就是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,它在 2 种状态下变化规律的差异性没有 NH_4^+-N 表现得那样明显,不过除个别时间段以外, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 在振荡状态下所表现的变化规律和静置状态下的变化也是截然相反的(图 3c);但 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化和沉积物再悬浮量的相关性不是很好(图 4c).

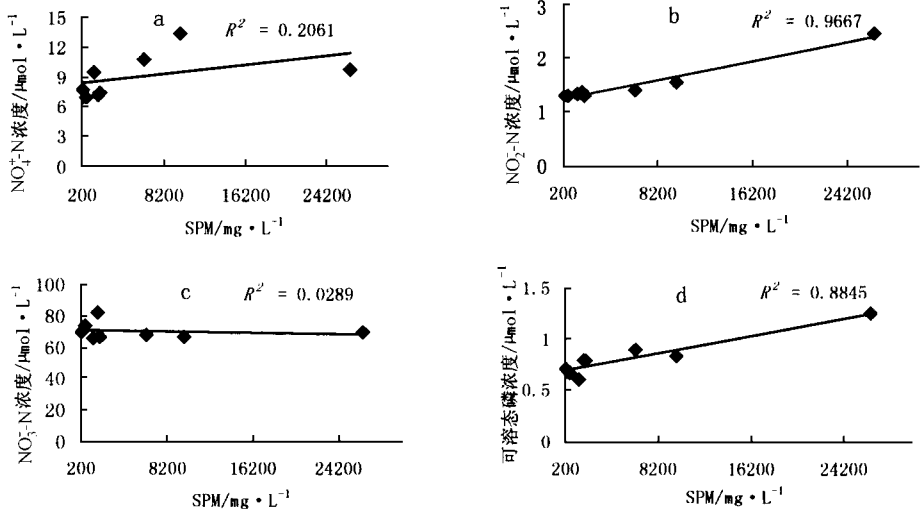


图 4 再悬浮过程中沉积物-水界面 NH_4^+ 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、DIP 变化和悬浮颗粒物的相关关系

Fig. 4 The correlativity between NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , DIP and suspended particle at the sediment-water interface following resuspension

(4) DIP 交换行为的变化 如图 3b 所示,在模拟实验过程中, DIP 的变化和静置状态下也出现了相反的规律.模拟初期,由于扰动作用较小,沉积物释放作用不明显,甚至出现了较小量的吸附,随着振动的加强以及再悬浮颗粒物浓度的逐渐增加,沉积物开始向水体中释放 DIP,由于悬浮颗粒物浓度的增加,悬浮颗粒物对 DIP 具有一定的吸附作用^[15],以致于在模拟

实验开始 300 min 内水体中 DIP 含量的变化非常小,变化值仅有 $0.05\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;但当振荡速度达到最大时,大量的表层沉积物由于再悬浮作用进入水体,使得表层甚至更深层沉积物中的磷酸盐进入上覆水体中,致使水体 DIP 的含量急剧上升,达到最大浓度,约为 $1.256\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,沉积物再悬浮释 P 达到一定程度会趋于下降,P 释放进入“枯竭”状态,此时沉积物中 P

向水体的释放与水体向沉积物上沉积和吸附过程达到一种动态平衡^[16],本研究由于取样限制,这方面还有待进一步研究.在实验中还发现,整个再悬浮过程中上覆水体中 P 的含量变化和再悬浮颗粒物浓度有着很好的相关性(图 4d).可见,振动强度对沉积物释 P 的影响十分明显,说明自然条件下风力、潮流和生物的扰动对崇明潮滩磷酸盐的释放影响较大.

3 结论

(1) 崇明东滩无机氮以 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 为主,其含量变化范围分别为: $6.392 \sim 4.947 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $45.82 \sim 69.708 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; NO_2^- -N 含量很低,浓度只有 $1.331 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, DIP 含量也很低,其范围只有 $0.396 \sim 0.963 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) 静置状态下沉积物-水界面水体中 NH_4^+ -N 浓度总体呈增长趋势,显示出整个培养过程中由沉积物向水体中释放; NO_2^- -N 在静置状态下表现出和 NH_4^+ -N 的变化规律一致. NO_3^- -N 的含量在 5 ~ 20 min 内表现出较强的释放后迅速降低,在 7h 以后几乎达到平衡.

(3) 沉积物再悬浮促进了沉积物中三态氮和 DIP 向水体中释放,使上覆水体中 N、P 含量上升,其中 NO_3^- -N 的释放量最大达到 $11.869 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 次之,释放量较小的是 NO_2^- -N 和 DIP.

(4) 再悬浮作用在很大程度上改变了三态氮和 DIP 在沉积物-水界面的交换行为,其中 NH_4^+ -N 在产生再悬浮和无再悬浮条件下的变化是完全相反的, NO_3^- -N 也表现出类似的规律, NO_2^- -N 的变化较复杂,产生再悬浮的初期与无再悬浮条件变化规律相反,后期变化一致;由于磷酸盐的吸附与解析以及受扰动强度的影响, DIP 在再悬浮过程中的初期变化不明显,后期出现较大释放.

(5) 在再悬浮实验中,上覆水体中 NH_4^+ -N 的前期变化和悬浮颗粒物浓度有着很好的正相关性,后期表现为负相关,在整个过程中 NO_2^- -N 和 DIP 的变化与悬浮颗粒物含量相关关系最

好, NO_3^- -N 表现最弱.

参考文献:

- 1 Scarlatos Panagiotis D. Experiments on water-sediment nutrient partitioning under turbulent, shear and diffusive conditions. *Water, Air and soil pollution*, 1997, **99**: 411 ~ 425.
- 2 李任伟. 沉积物污染和环境沉积学. *地球科学进展*, 1998, **4**(13): 398 ~ 402.
- 3 Boehm JP D. Coupling of pollutants between the estuary and continental shelf and sediments and water column in the New York Bight region. *Canadian of fisheries and Aquatic Science*, 1983, **40**: 262 ~ 276.
- 4 Achman D R, Brownawell B J, Zhang L. Exchange of polychlorinated biphenyls between sediment and water in the Hudson River Estuary. *Estuaries*, 1996, **19**: 950 ~ 965.
- 5 Baskaran M, Santschi P H. The role of particles and colloids in the transport of radio nuclides in coastal environments of Texas. *Marine Chemistry*, 1993, **43**: 95 ~ 114.
- 6 Moran S B, Moore R M. The potential source of dissolved aluminum from resuspended sediments to the north Atlantic Deep Sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, **55**: 2745 ~ 2751.
- 7 Morin J, Morse J W. Ammonium release from resuspended sediments in the Laguna Madre estuary. *Marine Chemistry*, 1999, **65**: 97 ~ 110.
- 8 Wainright S C. Sediment-to water of particulate material and microbes by resuspension and their contribution to the planktonic food web. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, **62**: 271 ~ 281.
- 9 Hermesen W, Sims I, Crane M. The bioavailability and toxicity to *Mytilus edulis* L. of two organ chlorine pesticides adsorbed to suspended solids. *Marine Environmental Research*, 1994, **38**: 61 ~ 69.
- 10 段水旺, 章申, 陈喜保等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计. *环境科学*, 2000, **21**(1): 53 ~ 56.
- 11 韩舞鹰, 容荣贵, 黄西能等. 海洋化学要素调查手册. 北京: 海洋出版社, 1986. 121 ~ 148.
- 12 刘素美, 张经, 于志刚等. 渤海莱州湾沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量. *环境科学*, 1999, **20**(2): 12 ~ 16.
- 13 Tengberg A, Almroth E, Hall P. Resuspension and its effects on organic carbon recycling and nutrient exchange in coastal sediment: in situ measurements using new experimental technology. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2002, **1** ~ 24.
- 14 Federico Spagnoli, Maria Cristina Bergamini. Water-sediment exchange of nutrients during early diagenesis and resuspension of anoxic sediments from the northern Adriatic sea shelf. *Water, Air and Pollution*, 1997, **99**: 541 ~ 556.
- 15 石晓勇, 史致丽, 余恒, 薛长玉. 1999 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨 I. 黄河口悬浮物对磷酸盐的吸附-解吸研究. *海洋与湖泊*, 2001, **30**(2): 192 ~ 197.
- 16 Tanaka K. Phosphate adsorption and desorption by the sediment in the Chikugo River estuary, Japan. *Bull Seikai Fish Res Lab*, 1988, **66**: 1 ~ 12.
- 17 张路, 范成新, 秦伯强等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究. *湖泊科学*, 2001, **13**(1): 35 ~ 42.