

补水条件改变对景观水体中沉积物氮磷释放的影响研究

熊家晴^{1,2}, 张 扬¹, 薛 涛¹, 刘言正¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 以再生水(TN、TP 浓度较高)和河水(水质较好)补水的人工景观湖泊沉积物为研究对象, 研究补水条件改变时沉积物中污染物的 TN、TP 吸附释放特性。结果表明: 以再生水作为补水水源时, 上覆水中 TN、TP 均表现为前期快速下降, 而后逐渐达到平衡的过程; 以自来水为补水水源时, 表现为沉积物中污染物向水体的释放, 以再生水补水的湖泊底泥释放大于以天然地表水为补水的湖泊底泥; 以再生水补水的沉积物吸附-释放临界浓度高于以河流水补水沉积物, 表明以再生水补水底泥的释放风险也越大; 无论是何种补水形式和沉积物的类型, 扰动均表现促进沉积物中污染物释放的趋势, 且促进作用的强弱与沉积物中污染物的形态有关。

关键词: 沉积物; 释放; 营养物; 补水形式; 扰动

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0728-06

Characteristics of nitrogen and phosphorus release from water sediment regarding different water replenishment approaches

XIONG Jiaqing^{1,2}, ZHANG Yang¹, XUE Tao¹, LIU Yanzheng¹

(1. Collge of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. The Ministry of Education Northwest Water Resources and environment Key Laboratory, Xi'an 710055, China)

Abstract: The characteristics of pollutants adsorption and desorption of two pond's sediments with different replenished water (reclaimed water and river water respectively) under static and dynamic conditions were studied. The results concluded that TN, TP showed a trend of rapid decline at the beginning and then gradually becomes flat. When using the reclaimed water of the two ponds as overlying water respectively, the contaminants tend to accumulate in sediments. Sediments of the ponds using reclaimed water as overlying water release more pollutants into water bodies greater than the sediments of the ponds using the lake water. It showed that the risk of sediments of the ponds using the reclaimed water release pollutants to the overlaying water is also great. Regardless of the water type and sediment in form of the disturbance showed the trend to promote the release of pollutants in sediments, as well as the strength and shape effects related to contaminants in sediments. The results have guiding significance in city water source pollution control.

Key words: sediments; release; nutrients(N、P); different water replenishing method; disturbance

氮和磷是湖泊富营养化的重要影响因素, 一方面氮和磷的过剩会导致水体的富营养化, 另一方面氮、磷也是水体生态系统中必不可少的元素^[1]。水体中的氮、磷元素会随着水体中的一系列生物、物理、化学作用下聚积在沉积物中, 同时在适当的情况下沉积物也会向水体中释放污染物, 造成二次污染^[2-5]。目前城市大多景观水体主要使用再生水和河水进行补水, 长期使用再生水和河水补水的水体, 容易导致沉积物中污染物的聚积,

突然改变补水方式对沉积物的物理化学性质都有重要的影响, 也可能导致水体营养负荷增加^[6]。在不同补水方式下沉积物有不同的理化性质, 表现在污染物浓度的差异和污染物形态的差异。不同的湖泊在上覆水水质突然变好的情况下, 底泥由于长期的污染物积累, 反而会变成水体中污染物新的来源。由于城市人工水体一般水深较浅, 扰动往往会造成沉积物和上覆水之间动态平衡发生变化, 有研究表明, 在有扰动的条件下, 沉积物中

收稿日期: 2016-10-08

修改稿日期: 2017-08-30

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07308-001-08、2013ZX07310-001)

第一作者: 熊家晴(1969—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为城乡给排水规划。E-mail: xiongjiaqing@xauat.edu.cn

通讯作者: 张扬(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城乡给排水规划。E-mail: 791585791@qq.com

营养元素的释放量远大于静态条件下的释放量^[7-10]。基于此, 本研究以两个不同补水类型的人工景观水体为研究对象, 比较了再生水补水和河水补水条件下的两个人工水体中底泥在不同的上覆水和动静态条件下污染物的吸附-释放特性, 研究结果对景观水体的污染控制有一定的指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究对象

试验选取了西安市两个不同补水类型的湖泊底泥。A 湖(汉城湖)使用河水补水, 水源来自水质较好的沣河; B 湖(思源湖)采用污水处理厂再生水做为补水水源, 水源取自思源污水处理厂的出水。两湖的主要概况及水源中的营养盐浓度见表 1。

表 1 AB 两湖泊主要概况

Tab. 1 Main general situation of A & B lakes

湖	补水 水源	水源水	水源水	沉积物	沉积物
		TN/ mg · L ⁻¹	TP/ mg · L ⁻¹	中 TN/ mg · kg ⁻¹	中 TP/ mg · kg ⁻¹
A 湖	沣河水	3.61	0.08	655.31	1 227.62
B 湖	再生水	12.38	2.11	1 581.13	2 768.44

注: TN 为总氮 TP 为总磷

1.2 样品采集及预处理

沉积物样品采集自 A 湖和 B 湖, 使用自制有机玻璃柱状采泥器采集表层 5~10 cm 的沉积物样品。B 应为长期使用再生水补水, 沉积物中污染物较多, 呈黑色淤泥, 含水率相对 A 湖沉积物较高。样品冷藏保存并立即送往实验室。沉积物样品经过筛分去除沙石及植物残体, 静置 1h 去除上覆水。同时取湖泊的水源水做为试验所用的上覆水, 经纤维膜过滤后冷藏保存, 做为试验过程中的补水等使用。

1.3 实验设置

按照不同的底泥, 上覆水和扰动条件, 试验分为 A1、A1 #、A2、A2 #、B1、B1 #、B2、B2 # 共 8 组实验, 具体试验设置见表 2。按照底泥: 上覆水为 1: 4 的比例设置, 先在 2 000 mL 烧杯中均匀铺设处理过的 400 mL 底泥, 在沿着烧杯内壁, 缓缓加入 1 600 mL 的不同上覆水, 避免冲击底泥, 导致水体浑浊。加入上覆水后均西安静置 12 h, 之后用搅拌机对需要扰动的水体进行扰动, 扰动强度以转速表征, 设置为 150 r/min, 扰动深度为上覆水表面。每间隔 12 h 取水面下 5 cm 处的水样 40 mL 测定水中 TN, TP 浓度, 并补充相应

体积的补给水。试验装置主要模拟自然条件下湖泊中的底泥与上覆水的比例, 并考虑水体中风浪等扰动而设置。

表 2 试验工况设置

Tab. 2 Test conditions settings

	底泥来源	上覆水类型	扰动方式
A1	A 湖	自来水	静止
A1 #	A 湖	自来水	150 r/min
A2	A 湖	水源水	静止
A2 #	A 湖	水源水	150 r/min
B1	B 湖	自来水	静止
B1 #	B 湖	自来水	150 r/min
B2	B 湖	水源水	静止
B2 #	B 湖	水源水	150 r/min

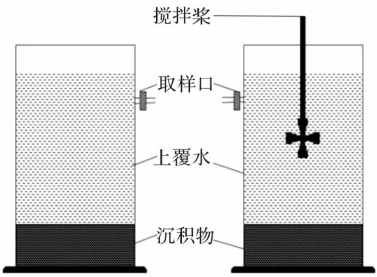


图 1 反应器构造示意图

Fig. 1 Reactor configuration schematic diagram

1.4 测量及计算方法

样品采集后, 总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解后用紫外分光光度法测定(GB 11894-89)、总磷(TP)用经过硫酸钾氧化后用钼酸铵分光光度法测定(GB 11893-89)^[11]。每 12 h 底泥释放量的计算公式如式(1)所示^[12]:

$$N_n - N_{n-1} = 12[(C_{n-1} - C_n)V + (C_a - C_{n-1})V]/t \tag{1}$$

式中: N_n 、 N_{n-1} 为第 n 次、 $n-1$ 次采样后底泥中氮磷营养盐的含量(mg); C_n 、 C_{n-1} 、 C_0 分别是第 n 、 $n-1$ 次和初始采样时上覆水中氮磷营养浓度(mg · L⁻¹); C_a 为补给水中营养物浓度(mg · L⁻¹); V 为反应器中上覆水体积。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中氮磷形态分析

按照底泥设置的不同, 实验可以划分为 A、B 两组, A(A1、A1 #、A2、A2 #)组试验中所用底泥取自汉城湖, B(B1、B1 #、B2、B2 #)组底泥来自思源湖底泥。B 湖由于一直使用再生水补给导

致营养盐浓度很高、富营养化程度比较严重,长期的沉积作用导致湖底沉积物中的氮磷含量分别达到 $2\,768.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1\,581.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相比之下采用河水补给的 A 湖的沉积物中的氮磷含量分别为 $1\,227.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $655.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;从图 2、4 可知,再生水长期补给的 B 湖沉积物中污染物浓度明显大于以河水补给的 A 湖。从图 3 可知,沉积物中氮元素主要存在形式以强氧化性提取氮的形式存在, A 湖中强氧化性提取氮占总氮的 60%, B 湖中则占到 75% 左右。由于氮的不同提取态按照释放的难易程度排序为:可交换态氮、弱酸可提取态、强氧化性提取氮、弱碱可提取氮。对比 AB 两湖底泥可见 B 湖污染物含量高,易释放的氮的形态占比高,导致 B 湖底泥中氮的释放风险高。水体中的高盐度可能会抑制底泥中氮的释放^[15], A 组试验水源水中盐度更高,可能从一定程度抑制了氮的释放。

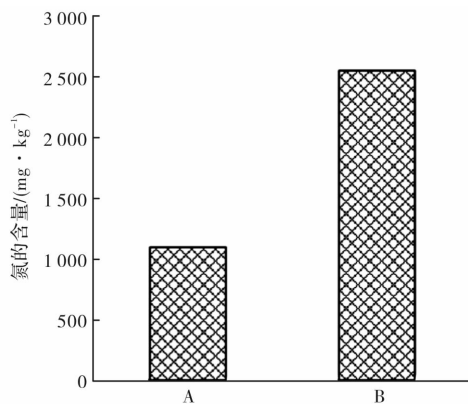


图2 沉积物中氮元素的含量

Fig. 2 Nitrogen element content of sediments

磷的形态可分为松散吸附态磷($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、水溶性磷(BD-P)、金属氧化物结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)。从图 5 可知,两湖中磷的主要赋存形态为钙结合态磷(HCl-P),在两湖沉积物中均占 60% 以上。有研究表明, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 BD-P 是沉积物中最易释放的磷的形态^[13]。易悬浮的颗粒物中有机磷的含量及其生物可转化性是决定湖体内源动态释放量的主要因素^[14]。B 湖底泥中 TP 含量高,易释放 BD-P 的磷的形态占比高,导致 B 湖沉积物的释放风险高。可见 B 湖沉积物的氮磷释放风险比 A 湖高。

水中的微量元素如 Fe 和 Al 等可能易造成磷的沉积,再生水中因为微量元素含量高更易导致水体中磷元素更易富集在沉积物中。

并不是所有形态的氮磷都能从沉积物中重新释放到水体中,因此研究沉积物中不同氮磷赋存

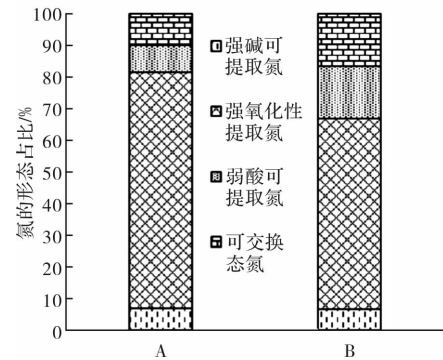


图3 沉积物中氮元素的形态分布

Fig. 3 Nitrogen element distribution form of

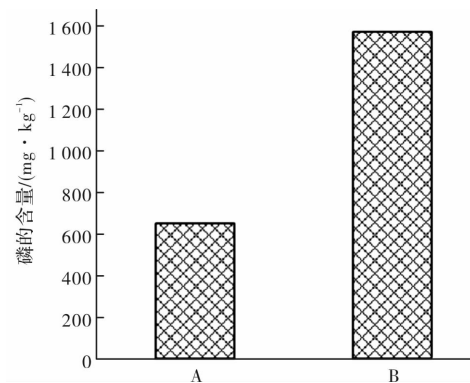


图4 沉积物中磷元素的含量

Fig. 4 Phosphorus element content in sediments

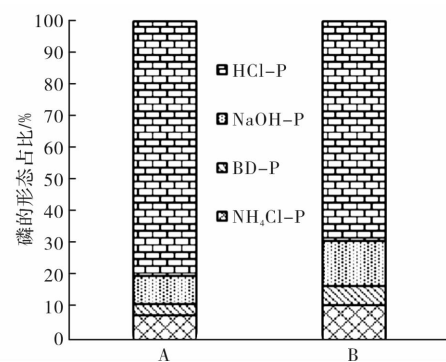


图5 沉积物中磷元素的形态分布

Fig. 5 Phosphorus element form distribution in the sediments

形态显得尤为重要。以磷为例, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 BD-P 是沉积物中最易释放的磷的形态,可以向水体中释放超过自身 50% 的含量^[13]。而钙结合态磷(HCl-P)主要是沉积物中由于生物作用沉积、团聚的颗粒磷,因而这类磷化合物难溶于水,是沉积物的主要组成形式,不易释放进入水体^[14]。B 湖底泥中 TP 含量高,易释放 BD-P 的磷的形态占比高,导致 B 湖沉积物的释放风险高。

对比 AB 两湖底泥可见 B 湖污染物含量高,易释放的氮、磷的形态占比高,导致 B 湖底泥中污染物释放风险高。可见 B 湖沉积物的氮、磷释放风险都比 A 湖高。

2.2 沉积物中 TN 的释放规律

图6、图7分别是A、B两组实验中上覆水中TN浓度变化曲线。在A、B两组实验中,使用水源水进行补水的A2、A2#、B2、B2#四组中水源中TN浓度高,表现为曲线起点高,呈下降趋势,且随着时间的推移下降幅度减小,并最终达到基本平衡状态,TN平衡浓度分别为A2: $1.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、A2#: $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、B2: $3.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、B2#: $4.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;下降幅度分别为A2: $2.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、A2#: $2.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、B2: $9.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、B2#: $8.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;可见B2、B2#比A2、A2#组平衡浓度高,但是下降幅度比A组大。有扰动的A2#、B2#比静止的A2、B2组相比,达到平衡时的浓度更高,TN下降幅度小。扰动可以促进底泥中的污染物与上覆水的交换强度,促进底泥向水体中释放,从而抑制底泥的吸附过程。使用自来水补水的A1、A1#、B1、B1#在反应一开始时上覆水中均不含TN,随着时间的推移,上覆水中的TN均呈现上升趋势。这4组实验中底泥表现为污染物向上覆水的释放。上覆水中TN的平衡浓度为A1: $0.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、A1#: $0.80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、B1: $1.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、B1#: $2.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;B组底泥中污染物浓度高,其易释放的氮的形态占比多,是导致其释放多的主要原因。可见长期使用再生水补水后底泥的释放风险提高。扰动对释放的促进作用表现为A1#、B1#的平衡浓度大于A1、B1。由图可知,无扰动时上覆水中氮的浓度高于 $1.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,表现为沉积物中污染物的富集,低于 $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 表现为沉积物中污染物的释放,因此A组沉积物中氮的吸附-释放临界浓度在 $0.7 \sim 1.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,同理可知有扰动时上升为 $0.8 \sim 1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。B组沉积物中氮的吸附-释放临界浓度在 $1.57 \sim 3.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,有扰动时上升为 $2.23 \sim 4.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可见扰动作为影响沉积物释放的因素,增加了沉积物的释放风险,提高了吸附-释放临界浓度。上覆水浓度介于吸附-释放临界浓度之间时,此时表现为上覆水与底泥之间的吸附-释放过程达到平衡,沉积物源、汇表现取决于环境因素。

底泥中的TN的富集与释放量可以根据公式(1)进行计算,图8、图9分别是A组(A1、A1#、A2、A2#)、B组(B1、B1#、B2、B2#)中每12h底泥中TN富集与释放的量。根据补水水源的不同底泥中TN表现为富集与释放的不同过程。以湖水补水的(A2、A2#)和以再生水补水的(B2、

B2#)均表现为底泥中TN的富集,A2、A2#中底泥中TN累计比较平缓,在整个实验过程中累积量都保持在 $1 \sim 0.5$ 之间,比较稳定。有研究表明^[16]底泥中营养物的释放与积累取决于上覆水与底泥间的浓度差。A2、A2#使用河水补水,与A湖中底泥见的浓度差小,所以富集过程比较稳定,累积量依此下降。而使用再生水的B湖,则有更高的富集速度,且表现为随时间变化富集量逐渐减小。B湖底泥污染严重,底泥释放过程中不稳定因素多,导致积累过程中波动大。使用再生水补水实验组的都表现为底泥中TN的释放。对比扰动和静止的实验组可见,无论使用再生水,湖水,或自来水,扰动均加速了底泥中TN的释放量。

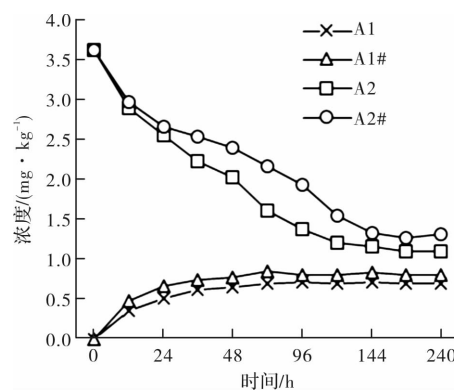


图6 A组反应器中上覆水TN浓度变化趋势图

Fig. 6 TN concentration change of overlying water in Group A

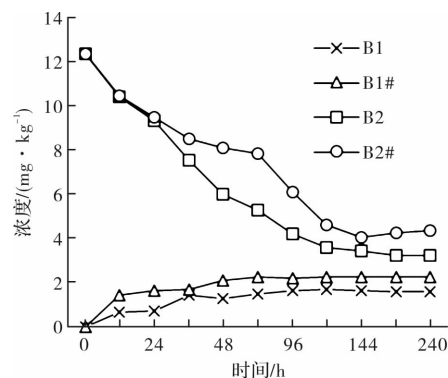


图7 B组反应器中上覆水TN浓度变化趋势图

Fig. 7 TN concentration change of overlying water in Group B

2.3 沉积物中 TP 的释放规律

图10、图11分别是A、B两组的上覆水中TP的变化情况,TP的变化趋势总体类似于TN的变化趋势,A2#、B2#在开始的12h内TP均上升,这是由于扰动导致水体中的TP的释放,相比于TN的释放曲线,可以看出,扰动对底泥中的TP释放过程的影响更大,更易促进TP的释放。随着时间的推移,扰动和非扰动组的差距进一步缩小,说明扰动对底泥中TP的释放效应减弱,这

是由于易被扰动释放的磷的形态占比逐渐减小所导致. 扰动也加大了底泥与上覆水之间的物质交换强度, 有助于底泥中的磷颗粒再悬浮以及溶解性磷的吸附和脱附. TP 达到平衡的时间均在 96h 左右, 相比于 TN 达到平衡的时间更短. A 组沉积物中磷的吸附-释放临界浓度在 $0.07 \sim 0.08$ 之间, 有扰动时上升为 $0.08 \sim 0.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. B 组沉积物中磷的吸附-释放临界浓度在 $0.36 \sim 0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 有扰动时上升为 $0.40 \sim 0.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

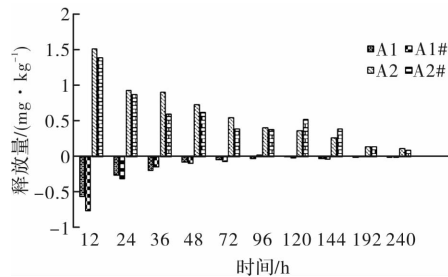


图 8 A 组反应器中底泥中 TN 每 12 h 的富集与释放量

Fig. 8 Adsorption and desorption of TN in Group A sediment every 12 h

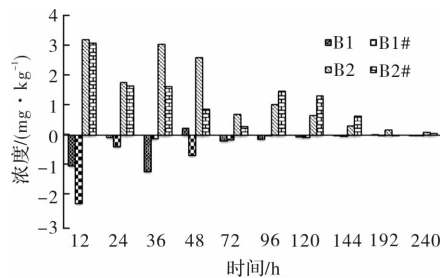


图 9 B 组反应器中底泥中 TN 每 12 h 的富集与释放量

Fig. 9 Adsorption and desorption of TN in Group B sediment every 12 h

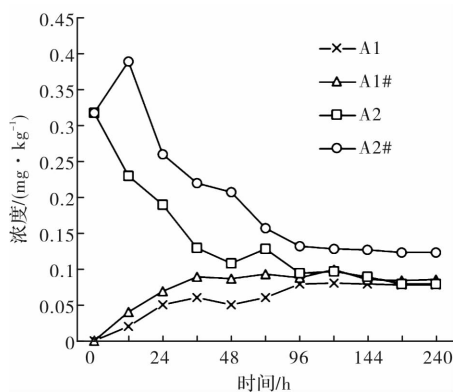


图 10 A 组反应器中上覆水 TN 浓度变化趋势图

Fig. 10 TP concentration change trend of overlying water in Group A

图 12、图 13 分别是 AB 两组反应器中底泥中 TP 每 12 h 的富集与释放量的变化. 由图可见, 上覆水为自来水的实验组均表现为底泥中 TP 的释放, 而以水源水为上覆水的实验组, 表现为底泥

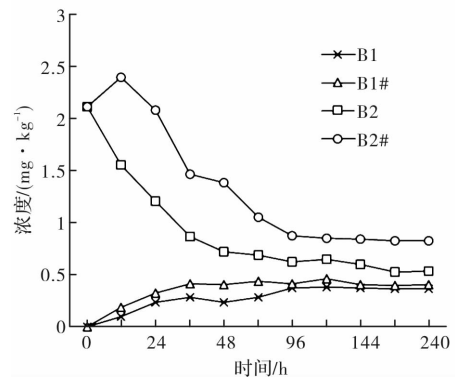


图 11 B 组反应器中上覆水 TN 浓度变化趋势图

Fig. 11 TP concentration change trend of overlying water in Group B

中 TP 的聚积. 在释放速率方面, A 组中 A2 组中底泥聚积速率最快, A2# 其次, 可见浓度差是聚积速率的主要影响因素, 扰动其次. A1# 底泥中污染物的释放速率大于 A1 可见扰动促进了底泥中 TP 的释放. B 组总体表现类似于 A 组. 但是在大部分时间段有扰动的 B2# 的吸收速率大于 B2, 说明不同的磷形态下, 扰动所产生的影响不近相同. 两组反应器在 96 h 之后, 释放吸收过程基本为零, 底泥不在吸收磷元素. 开始 12 h 内扰动导致底泥中的磷元素快速释放.

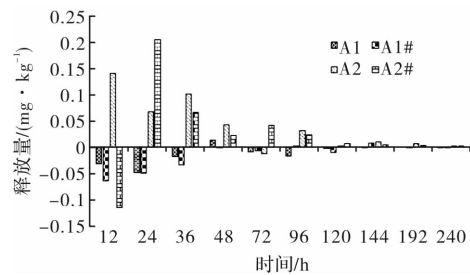


图 12 A 组反应器中底泥中 TP 每 12 h 的富集与释放量

Fig. 12 Adsorption and desorption of TP in Group A Sediment every 12 h

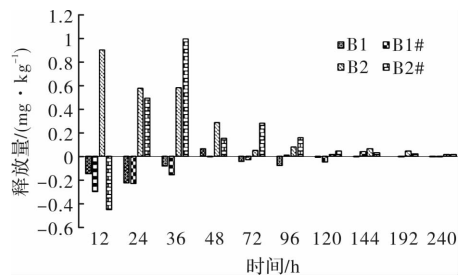


图 13 B 组反应器中底泥中 TP 每 12 h 的富集与释放量

Fig. 13 Adsorption and desorption of TP in Group B Sediment every 12 h

3 结论

通过对比不同底泥不同上覆水与不同扰动方式下沉积物中污染物的释放特性, 可以得出以下

结论.

(1)再生水补水湖泊中沉积物中氮磷含量分别为 $1\,581.13\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2\,768.44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 天然地表水补水湖泊沉积物中氮磷含量分别为 $655.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\,227.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 天然地表水补水湖泊底泥中氮磷赋存形态更为集中, 易释放形态含量较少.

(2)上覆水与沉积物之间营养元素之间的交换是一个动态平衡的关系, 存在吸附—释放临界浓度, 上覆水中营养元素浓度高则表现为在底泥中累积. 扰动是影响营养物释放的重要因素, 扰动加速了底泥中的营养物的释放.

(3)再生水补水湖泊沉积物实验组氮磷吸附—释放临界浓度高, 污染物的释放风险大, 水质变好沉积物更易向水体中释放污染物, 造成二次污染.

参考文献 References

- [1] 程丽巍, 许海, 陈铭达, 等. 水体富营养化成因及其防治措施研究进展[J]. 环境保护科学, 2007, 33 (1): 18-21.
CHENG Liwei, XU Hai, CHEN Mingda, et al. Review on causes of eutrophication of water body and its control measure [J]. Environmental Protection Science, 2007, 33 (1): 18-21.
- [2] SPEARS B M, PERKINS R, PATERSON D M. Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: spatio-temporal variation in phosphorus pools and release [J]. Hydrobiologia, 2007, 584: 37-48.
- [3] 尤本胜, 王同成, 范成新, 等. 风浪作用下太湖草型湖区水体 N、P 动态负荷模拟[J]. 中国环境科学, 2008, 28(1): 33-38.
YOU Bensheng, WANG Tongcheng, FAN Chengxin, et al. The simulation of ammonia nitrogen and phosphorus loading variations under the influence of wind-wave in aquatic macrophytes areas of Lake Taihu [J]. China Environmental Science, 2008, 28(1): 33-38.
- [4] SONDERGARD LM, JENSEN R J. Internal phosphorus loading in shallow Danish lakes [J]. Hydrobiology, 2004, 15 (6): 145-152.
- [5] YANG L Y, ZHANG L, ZHU G W. Mechanism and control of lake eutrophication [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 10 (3): 82-87.
- [6] 郭红兵, 陈荣, 王晓昌. 不同补水方式下翠湖沉积物氮磷释放特性研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 18-23.
GUO Hongbing, Chen RONG, WANG Xiaochang. Characteristics of nitrogen and phosphorus release from urban water sediment of Cuihu Lake regarding different water replenishment approaches [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 18-23.
- [7] 吴春笃, 王悦, 韩建刚, 等. 北固湿地底泥氮磷释放特征初步研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(4): 10-12.
WU Chundu, WANG Yue, HAN Jiangang, et al. Preliminary study on nitrogen and phosphorus release characteristics from sediment in Beigu wetland [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31 (4): 10-12. (in Chinese)
- [8] HOLDREN G C, DAVID E A. Factors affecting phosphorus release from intact lake sediment cores [J]. Environmental Science & Technology, 1980, 14 (1): 79-87.
- [9] 汪家权, 孙亚敏, 千家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 739-742.
WANG Jiaquan, SUN Yamin, QIAN Jiazhong, et al. Simulated study on phosphorus release of Chao Lake sediment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22 (6): 739-742.
- [10] 隋少峰, 罗启芳. 武汉东湖底泥释磷特点[J]. 环境科学, 2001, 22 (1): 102-105.
SUI Shaofeng, LUO Qifang. Release character of phosphorus from the sediments of East Lake, Wuhan [J]. Environmental Science, 2001, 22(1): 102-105.
- [11] GB 18918-2002: 城镇污水处理厂污染物排放标准[S]. GB 18918-2002, Pollutant Discharge Standard of Urban Sewage Treatment Plant [S].
- [12] 国家环境保护总局 水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Water and waste water monitoring and analysis methods of the state environmental protection bureau. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] WANG S, JIN X, ZHAO H, et al. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, 273 (1): 109-116.
- [14] 范成新, 张路, 秦伯强, 等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33 (8): 760-768.
FAN Chengxin, ZHANG Lu, QIN Boqiang, et al. The estimation of suspended phosphorus in the dynamics release under the influence of wind wave in Lake Taihu [J]. Science in China: Series D, 2003, 33(8): 760-768.
- [15] 文威, 孙学明, 孙淑娟, 等. 海河底泥氮磷营养物静态释放模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 295-300.
WEN Wei, SUN Xueming, SUN Shujuan, et al. Release of phosphorus and nitrogen from Haihe River sediments [J]. Journal of Agroenvironment Science, 2008, 27(1): 295-300.
- [16] 李彬, 张坤, 钟宝昌, 等. 底泥污染物释放水动力特征实验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23 (2): 126-133.
LI Bin, ZHANG Kun, ZHONG Baochang, et al. An experimental study on release of pollutants from sediment under hydrodynamic conditions [J]. Journal of Hydrodynamics: Edition A, 2008, 23(2): 126-133.

(编辑 沈 波)