

天然沸石和方解石复合覆盖技术抑制底泥磷释放的影响因素研究

林建伟¹, 朱志良^{1*}, 赵建夫¹, 詹艳慧²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 重庆大学资源与环境科学学院, 重庆 400044)

摘要:提出了天然沸石和方解石复合覆盖控制底泥氮磷释放的新技术, 并对该技术抑制底泥磷释放的能力及影响因素进行了研究. 结果表明, 天然沸石和方解石复合覆盖层不仅可以有效抑制底泥氨氮释放, 也可以有效抑制磷的释放. 复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率受天然沸石投加量、方解石投加量、天然沸石粒径、沸石与方解石组合方式等因素的影响. 随天然沸石和方解石投加量的增加, 复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率明显提高; 随天然沸石粒径的减小, 复合覆盖层抑制底泥磷释放的效果略微增强. 沸石和方解石的组合方式对复合覆盖层抑制底泥磷释放的规律为: 先覆盖沸石后覆盖方解石对底泥磷释放的抑制效果明显强于先覆盖方解石再覆盖沸石条件下的情况, 与沸石方解石混合均匀覆盖情况相比, 先覆盖沸石后覆盖方解石对底泥磷释放的效果也略有提高.

关键词:天然沸石; 方解石; 复合覆盖层; 底泥; 磷释放; 影响因素

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0397-06

Influencing Factors of Phosphorus Release Control from Sediments by Compound Barrier Constructed with Zeolite and Calcite

LIN Jian-wei¹, ZHU Zhi-liang¹, ZHAO Jian-fu¹, ZHAN Yan-hui²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Resource and Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A novel compound barrier technology for the control of phosphorus and nitrogen release from sediments was reported. The compound barrier was constructed with zeolite and calcite. Using this compound barrier technology, various influencing factors of phosphorus release from the sediments were investigated. The results showed that the compound barrier with calcite and zeolite can not only control the ammonia release from the sediment, but also reduce the phosphorus release from the sediment effectively. The efficiency of the compound barrier to immobilize the phosphorus of sediments increased with the increment of the quantity of zeolite or calcite. The efficiency was also affected by the grain size of the zeolite. The less the grain sizes of the zeolite, the more the efficiency. The construction mode of the compound barrier played an important role in the control efficiency of phosphorus release from the sediments. It was found that the efficiency of barrier mixed with zeolite and calcite was slightly less than that of the barrier made up of zeolite (underlayer) and calcite (superstratum). The compound barrier with zeolite (underlayer) and calcite (superstratum) can control phosphorus release much more efficiently than the barrier with zeolite (superstratum) and calcite (underlayer).

Key words: compound barrier; zeolite; calcite; sediments; phosphorus release; influencing factors

底泥覆盖, 即于污染底泥上部覆盖一层或多层覆盖层使底泥与上覆水隔开并阻止底泥中污染物的释放, 是具有广阔发展前途的一种底泥污染控制技术^[1~5]. 天然沸石是自然界中广泛存在的一种硅铝酸盐矿物, 具有较高的阳离子交换和物理吸附能力^[6~10]. 采用沸石构造底泥覆盖系统可以有效抑制底泥氨氮和重金属等阳离子污染物的释放^[11~13]. 方解石的化学成分为 CaCO_3 , 是晶型属三方晶系的碳酸盐矿物. Berg 等考察了方解石覆盖技术控制底泥磷释放的效果, 结果表明 1cm 厚的方解石覆盖层 2~3 月内可以减少 80% 的底泥磷释放通量^[14]. 通过对比分析天然沸石覆盖和方解石覆盖对底泥氮磷释放控制的特点, 可以发现: 天然沸石覆盖可以有效地

抑制底泥氨氮的释放, 而对底泥磷释放的抑制效率则较差; 方解石覆盖可以较为有效地抑制底泥磷的释放, 而对于底泥氨氮释放的抑制效果则较差. 若采用天然沸石和方解石构造底泥复合覆盖系统, 可能不仅可以有效地抑制底泥氨氮的释放, 而且还可以有效地抑制底泥磷的释放. 为此, 本研究通过试验模拟, 首先考察了天然沸石和方解石复合覆盖技术抑制底泥氨氮和总磷释放的能力, 再对复合覆盖技术

收稿日期: 2006-02-28; 修订日期: 2006-07-04

基金项目: 科技部小城镇科技发展重大项目(2003BA808A17); 国家自然科学基金项目(50478103)

作者简介: 林建伟(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制原理与技术, E-mail: linjianwei_1978@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zzl@mail.tongji.edu.cn

抑制底泥磷释放效率的各种影响因素进行了研究,旨在为底泥污染物释放的控制提供理论与技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验材料

利用自制的底泥采样器采集同济大学三好坞富营养化景观水体的底泥样品,再送至实验室进行底质分析和氮磷的释放控制模拟试验.底泥的本底值分析指标包括 pH 值、有机质、总氮、总磷以及氨氮.氨氮和总氮采用智能化土壤肥力测定仪分析测定;pH 值、总磷和有机质采用文献[15]推荐的方法测定.天然沸石购自浙江省缙云县鸿达沸石厂.底泥和天然沸石的性质见参考文献[13].方解石购自浙江长兴南方微粉厂,粒径为 300 目.模拟试验反应器采用 1L 的广口试剂瓶(直径约 10cm).

1.2 试验方法

1.2.1 Na^+ 和 Ca^{2+} 浓度对方解石除磷性能影响研究

称取 2.0 g 方解石于具塞锥形瓶中,加入含一定硬度(采用 CaCl_2 调节)或盐度(采用 NaCl 调节),并且 pH 值为 7.5(采用 NaOH 和 HCl 调节)的 KH_2PO_4 溶液 100 mL,置于摇床上振荡(转速 150 r/min,温度 30 ℃) 48 h 后离心分离,再采用钼锑抗比色法测定上清液的磷酸盐浓度.

1.2.2 方解石去除磷酸盐的动力学研究

称取 2.0 g 方解石于具塞锥形瓶中,加入 pH 值为 7.5(采用 NaOH 和 HCl 调节)、初始磷浓度为 10 mg/L KH_2PO_4 溶液 200 mL 后,置于摇床上振荡(转速 150 r/min,温度 30 ℃),每间隔一定时间取 20 mL 溶液,经离心分离后采用钼锑抗比色法测定上清液中磷酸盐浓度.

1.2.3 天然沸石与铵之间的离子交换特性研究

称取 1.0 g 不同粒径天然沸石置于聚乙烯离心管中,加入氨氮初始浓度分别为 80 mg/L、160 mg/L、240 mg/L、320 mg/L 和 400 mg/L 的氯化铵溶液 25 mL,再置于摇床上振荡达到吸附平衡(转速 150 r/min,温度 25 ℃),离心后采用纳氏试剂比色法测定各平衡氨氮浓度,并采用 ICP-AES 测定溶液中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度.

1.2.4 天然沸石和方解石复合覆盖技术抑制底泥磷释放影响因素研究

采用模拟试验研究天然沸石与方解石复合覆盖层控制底泥磷释放效率的影响因素,设计 11 个方案

(见表 1).

表 1 试验方案设计

Table 1 Scheme design of experiments

方案	天然沸石 投加量/g	天然沸石 粒径	方解石 投加量/g	沸石和方解石的 投加方式
方案 1	0	—	0	—
方案 2	0	—	100	—
方案 3	50	3 ~ 5 mm	100	混合均匀
方案 4	100	3 ~ 5 mm	100	混合均匀
方案 5	200	3 ~ 5 mm	100	混合均匀
方案 6	100	3 ~ 5 mm	200	混合均匀
方案 7	100	2 ~ 3 mm	100	混合均匀
方案 8	100	10 ~ 20 目	100	混合均匀
方案 9	100	3 ~ 5 mm	150	先方解石,再沸石
方案 10	100	3 ~ 5 mm	150	先沸石,再方解石
方案 11	100	3 ~ 5 mm	150	混合均匀

将完全混合均匀的新鲜底泥自反应器顶部加入,使底泥层厚度约为 4 cm,用黑纸遮住反应器以避光.模拟期间上覆水保持厌氧状态(采用氮气吹脱实现).每间隔一段时间取上覆水通过钼锑抗比色法测定总磷浓度和通过纳氏试剂比色法测定氨氮浓度.

1.3 数据处理

覆盖技术对底泥氮磷释放通量的抑制率采用以下公式加以计算: $h = (c_0 - c)/c_0$, 其中, h 为覆盖技术对底泥氮磷释放通量的抑制率(%), c_0 为无覆盖条件下上覆水的氮磷浓度(mg/L), c 为覆盖条件下上覆水的氮磷浓度(mg/L).

2 结果与讨论

2.1 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度及反应时间对方解石除磷性能的影响

图 1 为 Ca^{2+} 浓度对方解石除磷性能影响的试验结果[磷初始浓度为 2 mg/L, $c(\text{HCO}_3^-) = 0$ mmol/L].从图 1 可以看出, Ca^{2+} 促进了方解石对磷酸盐的去除,并且 Ca^{2+} 浓度越高,对方解石除磷的促进作用越强.当初始磷浓度为 2 mg/L 时, Ca^{2+} 浓度由 0 mmol/L 增加到 5 mmol/L,相应的方解石对磷的去除率则由 41% 增加到 86%.原因可以从方解石去除磷酸盐的机制方面加以解释.碳酸钙饱和指数 (SI_{CaCO_3}) 决定了方解石去除水中磷酸盐的机制:当 $SI_{\text{CaCO}_3} \geq 0$ 时,方解石去除磷的机理主要是吸附和与碳酸钙同时共沉淀作用,以及以方解石作为结晶核的钙磷化合物的结晶作用;当 $SI_{\text{CaCO}_3} < 0$ 时,方解石对磷酸盐的去除主要通过吸附和结晶作用,并且方

解石溶解会导致 Ca^{2+} 浓度的增加,进而促进钙磷化合物沉淀的生成^[14,16,17].当 $SI_{\text{CaCO}_3} < 0$ 的条件下,溶液的 Ca^{2+} 浓度越高,会使通过结晶作用去除的磷酸盐越多.

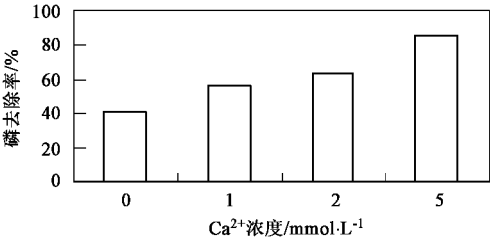


图 1 Ca^{2+} 浓度对方解石去除磷酸盐的影响
Fig.1 Effect of Ca^{2+} on phosphorus removal by calcite

图 2 为 Na^+ 浓度对方解石除磷性能影响的试验结果(磷初始浓度为 10 mg/L).从图 2 可以看出,随着溶液 Na^+ 浓度的增加,方解石对磷酸盐的去除率相应下降. Na^+ 的存在,会使溶液离子强度增加,离子的活度则相应下降,离子之间的有效碰撞几率降低,即“动力学盐效应”^[18].所以,增加溶液 Na^+ 的浓度,一方面降低了方解石 Ca^{2+} 活度的溶出速率,另一方面亦使得离子之间有效碰撞的几率降低,从而使得以方解石为结晶核的钙磷化合物的结晶速率降低,从而导致方解石除磷效率的下降.

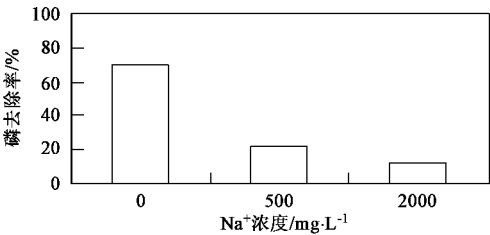


图 2 Na^+ 对方解石除磷性能的影响
Fig.2 Effect of Na^+ on phosphorus removal by calcite

图 3 为反应时间对方解石去除磷酸盐影响的试验结果.从图 3 可以看出,反应时间对方解石除磷性能影响较大.对于初始磷浓度为 10 mg/L 的溶液, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下 $0\sim 10\text{ h}$ 之间方解石去除磷酸盐的速率较快,此后速率变缓, 24 h 之后反应时间对方解石除磷的影响已经很小.说明方解石与磷酸盐的反应时间越长,溶液中磷酸盐被去除得越彻底.

2.2 天然沸石与铵之间的离子交换特性

通过试验研究发现,浙江缙云产天然沸石与铵之间的离子交换主要以 Na^+ 和 Ca^{2+} 为主, K^+ 和 Mg^{2+} 基本不参与交换.图 4~6 分别为粒径对天然沸

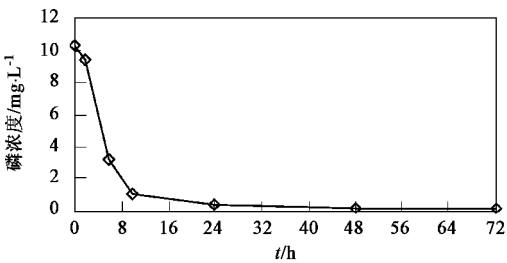


图 3 反应时间对方解石去除磷的影响
Fig.3 Effect of reaction time on phosphorus removal by calcite

石氨氮吸附量、 Na^+ 交换量和 Ca^{2+} 交换量影响的试验结果.从图 4~6 可以看出,随着氨氮初始浓度的增加,天然沸石对氨氮的吸附量逐渐增加,且对应的交换出来的钠钙离子量亦逐渐增大.从图 4 还可以看出,粒径越小,沸石对氨氮的吸附能力越强.粒径对天然沸石 Na^+ 和 Ca^{2+} 的交换量亦影响较大,且粒径越小,沸石 Na^+ 和 Ca^{2+} 的交换量亦越大,氨氮初始浓度 320 mg/L 条件下,粒径 $2\sim 3\text{ mm}$ 、 $20\sim 40$ 目和 $40\sim 100$ 目天然沸石与粒径 $3\sim 5\text{ mm}$ 天然沸石相比, Ca^{2+} 交换量分别提高了 0.76 、 3.2 和 5.1 倍,而 Na^+ 交换量则分别提高了 0.31 、 1.3 和 2.1 倍(见图 5 和图 6).

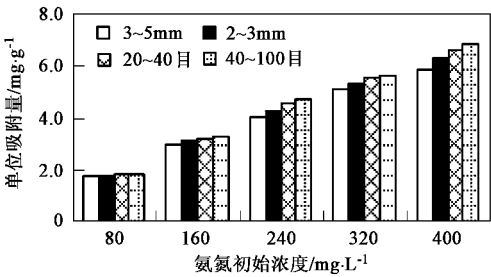


图 4 粒径对天然沸石吸附氨氮的影响
Fig.4 Effect of grain size on ammonium sorption on zeolite

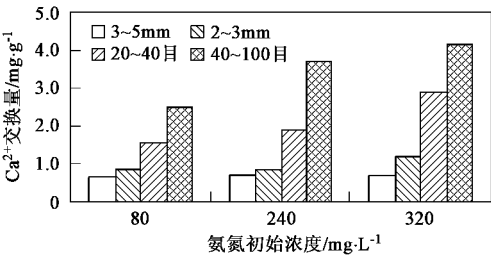


图 5 粒径对天然沸石 Ca^{2+} 交换量的影响
Fig.5 Effect of grain size on Ca^{2+} release from zeolite

2.3 天然沸石和方解石复合覆盖层抑制底泥氮磷释放的效果分析

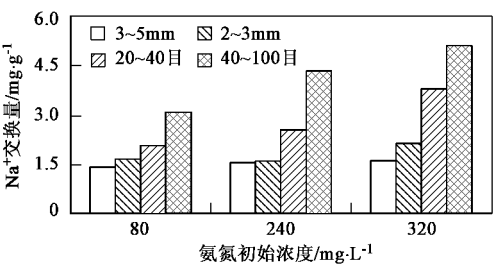


图 6 粒径对天然沸石 Na^+ 交换量的影响

Fig.6 Effect of grain size on Na^+ release from zeolite

2.3.1 天然沸石和方解石复合覆盖层对底泥氨氮释放的影响

表 2 为天然沸石和方解石复合覆盖层对底泥氨氮释放影响的试验结果.从表 2 可以看出,厌氧状态下无覆盖的底泥释放出大量的氨氮,到第 115 d 上覆水的氨氮浓度达到了 24.1 mg/L;方解石覆盖对底泥氨氮释放的抑制效果则较差,到第 115 d 方解石覆盖层作用下上覆水的氨氮浓度达到了 20.2 mg/L,仅比空白对照条件下上覆水氨氮浓度略低.而天然沸石和方解石复合覆盖层则对底泥氨氮释放的抑制效果较好,到第 115 d 的上覆水氨氮浓度仅为 1.12 mg/L,对底泥氨氮释放的抑制率达到了 95% 左右.复合覆盖层有效抑制底泥氨氮释放的原因是天然沸石对氨氮的物理吸附和阳离子交换作用^[6,7].

表 2 天然沸石与方解石复合覆盖层对底泥氨氮释放的影响(第 115 d)

Table 2 Effect of compound barrier with zeolite and calcite on ammonia release from sediments(the 115 th day)			
覆盖层类型	50 g 天然沸石和 100 g 方解石	100 g 方解石	空白对照
氨氮浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.12	20.2	24.1

2.3.2 天然沸石和方解石复合覆盖层对底泥总磷释放的影响

图 7 为方案 1~6 上覆水总磷浓度的变化情况.从图 7 可以看出,厌氧状态下底泥磷逐渐释放出来,这主要是因为厌氧条件下不溶性 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 转变为可溶性 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,可使与铁结合的磷大量进入水体的缘故^[19,20].从图 7 还可以看出,采用方解石覆盖可以较好地抑制底泥磷的释放,模拟期间 100 g 方解石覆盖对底泥总磷释放的抑制率达到 56%.而方解石覆盖的基础上再投加天然沸石构造复合覆盖层(沸石和方解石混合均匀),可以提高覆盖层对底泥磷释放抑制的效果,100 g 方解石和 50 g 天然沸石作用下第 72 d 的上覆水总磷浓度与 100 g 方解石单纯

覆盖相比下降了 27% 左右(见图 7 的方案 2 和方案 3).原因可能包括以下几个方面:一方面,天然沸石的投加增加了覆盖层的厚度,延长了底泥所释放的磷穿过覆盖层到达上覆水的时间,不仅可以使覆盖层的机械阻挡作用增强,而且会使方解石与磷的反应时间变长,从而对底泥磷释放的抑制效果更好;另一方面,天然沸石与底泥释放的氨氮进行离子交换而释放出一定的 Ca^{2+} ,促进了方解石对磷的去除.

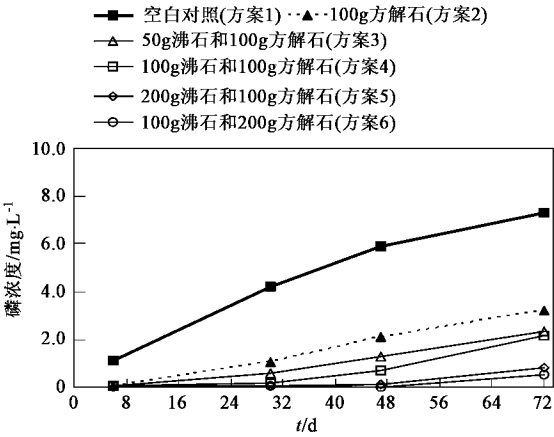


图 7 投加量对天然沸石和方解石复合覆盖层控制底泥磷释放的影响

Fig.7 Effect of quantity of zeolite and calcite on efficiency of barriers to control phosphorus release from sediments

2.4 天然沸石和方解石复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响因素

2.4.1 天然沸石投加量对复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响

从图 7 还可以看出,方解石投加量一定的条件下,随着天然沸石投加量的增加,沸石和方解石复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率提高.100 g 方解石作用下,天然沸石投加量从 50 g 增加到 200 g,对应的第 72 d 上覆水的总磷浓度从 2.35 mg/L 下降到 0.81 mg/L,即到模拟结束复合覆盖层对底泥磷释放的抑制率从 68% 增加到 89%.原因主要是:随着天然沸石投加量的增加,导致复合覆盖层厚度增加,使得覆盖层对磷迁移的机械阻挡作用和方解石对磷的固定作用亦得到加强.

2.4.2 方解石投加量对复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响

从图 7 还可以看出,天然沸石投加量一定的条件下,随着方解石投加量的增加,天然沸石和方解石复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率随之增加(沸石投加量 100 g 的条件下,当方解石投加量从 100 g 增

加到 200 g 时,对应的第 72 d 上覆水总磷浓度从 2.15 mg/L 下降到 0.54 mg/L,即复合覆盖层对底泥磷释放的抑制率从 70% 增加到 93%。原因主要是:随着方解石投加量的增加,复合覆盖层的厚度随之增加,底泥所释放出来的磷穿过覆盖层到达上覆水的时间越长,从而会使方解石与磷反应越充分。

2.4.3 天然沸石粒径对复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响

图 8 为天然沸石粒径对复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响。从图 8 可以看出,粒径对复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率产生一定的影响,即粒径越小(20 目~5 mm),复合覆盖层对底泥磷释放的抑制效果越好,模拟试验条件下天然沸石粒径由 3~5 mm 减少到 10~20 目,对应的复合覆盖层作用下上覆水的总磷浓度则由 0.030 mg/L 下降到 0.020 mg/L(第 6 d)、0.203 mg/L 下降到 0.089 mg/L(第 30 d)、0.679 mg/L 下降到 0.416 mg/L(第 47 d)、2.15 mg/L 下降到 1.92 mg/L(第 72 d)。原因可能是:粒径越小,一方面天然沸石与铵之间离子交换所释放的 Na^+ 越多,对方解石固定磷酸盐的抑制作用越强,另一方面天然沸石与铵之间离子交换释放出的 Ca^{2+} 量亦越多,对方解石固定磷酸盐的促进作用越强,而模拟期间 Ca^{2+} 对方解石去除磷酸盐促进作用的增强效果超过了 Na^+ 对方解石去除磷酸盐抑制作用的增强效果,从而使得复合覆盖层对底泥磷释放的抑制作用增强。

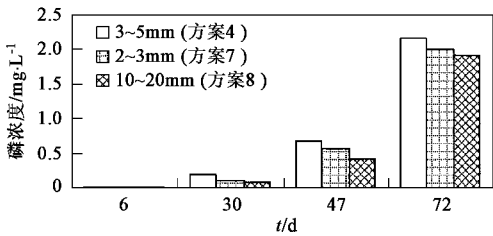


图 8 粒径对天然沸石和方解石复合覆盖层抑制底泥磷释放的影响

Fig.8 Effect of zeolite's grain size on efficiency of compound barrier to control phosphorus release from sediment

2.4.4 天然沸石与方解石组合方式对复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响

图 9 为沸石和方解石组合方式对复合覆盖层抑制底泥磷释放效率的影响。从图 9 可以看出,先覆盖沸石后覆盖方解石对底泥磷释放的抑制效果和沸石方解石混合均匀覆盖情况下相比仅有少许增加,但明显强于先覆盖方解石再覆盖沸石条件下的抑制效

率。原因可能是:沸石和方解石混合均匀覆盖情况下,沸石吸附氨氮释放出来的 Ca^{2+} ,比先覆盖方解石再覆盖沸石情况下更容易到达方解石表面,且混配使得底泥所释磷与方解石反应的时间更长,从而使得前者条件下的方解石除磷效率强于后者条件下的方解石除磷效率。

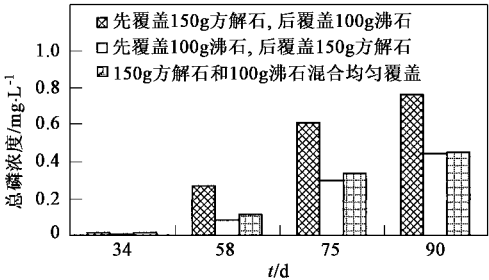


图 9 不同组合方式对沸石和方解石复合覆盖层抑制底泥磷释放的影响

Fig.9 Effect of compound mode on efficiency of barrier to immobilize phosphorus release from sediment

3 结论

(1) 天然沸石和方解石复合覆盖层不仅可以有效抑制底泥氨氮的释放,而且可以有效抑制底泥磷的释放。

(2) 复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率受天然沸石投加量、方解石投加量、天然沸石粒径、沸石与方解石组合方式等影响。

(3) 随天然沸石和方解石投加量的增加,复合覆盖层抑制底泥磷释放的效率明显提高;随天然沸石粒径的减小,复合覆盖层抑制底泥磷释放的效果略微增强;沸石和方解石的组合方式对复合覆盖层抑制底泥磷释放的规律为:先覆盖沸石后覆盖方解石对底泥磷释放的抑制效果与沸石方解石混合均匀覆盖情况相比略微提高,且明显强于先覆盖方解石再覆盖沸石条件下的抑磷效果。

参考文献:

[1] 朱广伟,陈英旭,田光明. 水体沉积物的污染控制技术研究进展[J]. 农业环境保护, 2002, 21(4): 378~380.

[2] 敖静. 污染底泥释放控制技术的进展[J]. 环境保护科学, 2004, 30(6): 29~32.

[3] 陈华林,陈英旭. 污染底泥修复技术进展[J]. 农业环境保护, 2002, 21(2): 179~182.

[4] Murphy T P, Lawson A, Kumagai M, et al. Review of emerging issues in sediment treatment [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1999, 2: 419~434.

[5] Palermo M R. Design considerations for in-situ capping of contaminated sediments [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(6~7): 315~321.

- [6] 张曦, 陆轶峰. 天然沸石吸附技术防治暴雨径流氮磷污染[J]. 云南环境科学, 2003, **22**(1): 49 ~ 51.
- [7] 温东辉, 唐孝炎, 马倩如. 天然沸石铵吸附容量研究[J]. 环境科学研究, 2003, **16**(2): 31 ~ 34.
- [8] 徐丽花, 周琪. 沸石去除废水中氨氮及其再生[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(3): 24 ~ 26.
- [9] Myroslav S, Mariya L, Artur P T, *et al.* Ammonium sorption from aqueous solutions by the natural zeolite Transcarpathian clinoptilolite studied under dynamic conditions [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2005, **284**: 408 ~ 415.
- [10] Englert A H, Rubio J. Characterization and environmental application of a Chilean natural zeolite[J]. Int. J. Miner. Process, 2005, **75**: 21 ~ 29.
- [11] Jacobs P H, Förstner U. Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier system (ABS) using natural and modified zeolite [J]. Water Research, 1999, **33**(3): 2083 ~ 2087.
- [12] Jacobs P H, Waite T D. The role of aqueous iron (II) and manganese (II) in sub-aqueous active barrier systems containing natural clinoptilolite[J]. Chemosphere, 2004, **54**: 313 ~ 324.
- [13] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 天然沸石覆盖层控制底泥氮磷释放的影响因素[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 880 ~ 884.
- [14] Berg U, Neumann T, Donnert D, *et al.* Sediment capping in eutrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus [J]. Applied Geochemistry, 2004, **19**: 1759 ~ 1771.
- [15] 中国土壤学会农业化学专业委员会编. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [16] Plant L J, House W A. Precipitation of calcite in the presence of inorganic phosphate[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2002, **203**: 143 ~ 153.
- [17] Song Y H, Weidler P G, Berg U, *et al.* Calcite-seeded crystallization of calcium phosphate for phosphorus recovery [J]. Chemosphere, 2006, **63**(2): 236 ~ 243.
- [18] 曾玉彬, 李慧敏, 牛庆华, 等. 高盐度水中碳酸钙结晶速率常数影响因素研究[J]. 江汉石油学院学报, 2001, **23**(2): 56 ~ 57.
- [19] 王雪蕾, 王金生, 王宁, 等. 四平市二龙湖底泥磷释放研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, **6**(9): 47 ~ 50.
- [20] 董浩平, 姚琪. 水体沉积物磷释放及控制[J]. 水资源保护, 2004, **20**(6): 20 ~ 23.