

方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放的影响因素研究

林建伟^{1,2}, 朱志良^{2*}, 赵建夫², 詹艳慧³

(1. 上海水产大学海洋学院, 上海 200090; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 3. 上海川吉投资管理有限公司, 上海 200235)

摘要:通过摇床振荡试验和底泥磷释放控制模拟试验, 考察了覆盖系统厚度、上覆水 Ca^{2+} 浓度、温度、方解石粒径以及人工曝气等对方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响。结果表明, 方解石覆盖系统可以抑制厌氧状态下底泥磷的释放, 且抑制效果受覆盖系统厚度、上覆水 Ca^{2+} 浓度、温度、方解石粒径及人工曝气等的影响。方解石覆盖系统对底泥磷释放的抑制效率随厚度的增加而明显提高, 方解石投加量由 12.7 kg/m^2 增加到 38.2 kg/m^2 , 模拟期间覆盖系统对底泥磷释放的抑制率则由 56% 增加到 99%; 上覆水的 Ca^{2+} 会增强方解石覆盖系统对底泥磷释放抑制的效率, 上覆水 Ca^{2+} 浓度由 1 mmol/L 增加到 5 mmol/L , 模拟期间上覆水的磷浓度下降 36% 左右; 对于方解石投加量较少的情况下, 高温条件与低温条件相比, 底泥向上覆水释放更多的磷, 而通过增加覆盖系统的厚度可以消除高温所带来的不利影响; 方解石覆盖系统对底泥磷释放的抑制效率随粒径的减小而明显增强; 对方解石覆盖系统表面进行人工曝气, 不仅可以降低底泥氨氮的释放速率, 而且还可以降低底泥磷的释放速率。

关键词:底泥; 活性覆盖系统; 方解石; 释放控制; 影响因素; 磷酸盐

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0121-06

Influencing Factors of Calcite Active Barrier System to Control Phosphorus Release from Sediments

LIN Jian-wei^{1,2}, ZHU Zhi-liang², ZHAO Jian-fu², ZHAN Yan-hui³

(1. School of Marine Science & Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Chuanji Investment Management Co., Ltd., Shanghai 200235, China)

Abstract: Influencing factors of calcite active barrier system to control phosphorus release from sediments were researched, including barrier thickness, Ca^{2+} of overlying water, temperature, calcite's grain size and artificial aeration. The results show that the calcite barrier can effectively control phosphorus release from sediments under anaerobic conditions, and its efficiency was influenced by barrier thickness, Ca^{2+} concentration of overlying water, temperature, calcite's grain size and artificial aeration. The efficiency of calcite barrier to control phosphorus release from sediments will increase with the increment of Ca^{2+} concentration of overlying water and barrier thickness. Application of 12.7 kg/m^2 calcite active barrier system resulted in 56% reduction of phosphorus flux from sediment for 72 days; however 99% reduction was obtained by 38.2 kg/m^2 calcite active barrier system. When the Ca^{2+} concentration of overlying water increased from 1 mmol/L to 5 mmol/L , the phosphorus concentration was reduced by about 36% in the 72th day. In comparison to low temperature, high temperature was disbeneficial to control phosphorus release from sediments by a thin calcite barrier. The smaller the grain sizes of calcite, the more efficient the calcite barrier. The ammonia and phosphorus release rate from sediments under calcite barrier will be decreased by aeration.

Key words: sediments; active barrier system; calcite; release control; influencing factors; phosphorus

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和阻止底泥污染物的释放, 是目前受到广泛重视的一种底泥污染原位控制技术^[1~12]。与传统底泥覆盖系统(由清洁的沉积物、沙子或砾石等材料构成)相比, 底泥活性覆盖系统(由可以吸附或者共沉淀污染物的材料构成)可以更为有效地控制底泥污染物的释放^[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, 对磷酸盐具有较强的固定能力^[14~17], 可以作为底泥活性覆盖系统的覆盖材料^[18]。Berg 等^[18]考察了方解石覆盖系统抑制底泥磷释放的效率, 结果表明 1cm

厚的方解石覆盖系统 2~3 月内可以减少 80% 的底泥磷释放通量, 且方解石覆盖系统对底泥磷释放控制的效率可以通过调节水体的水化学状况加以优化。Barry 等^[19]则考察了 3 种形式的碳酸钙(破碎的石灰石和 2 种沉淀方解石)构造的覆盖层控制底泥

收稿日期: 2007-01-28; 修订日期: 2007-04-28

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); 上海水产大学博士启动基金项目(6750306327); 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金项目(677030701801)

作者简介: 林建伟(1978~), 男, 博士, 主要研究方向为水污染控制与资源化, E-mail: linjianwei@126.com

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

磷释放的效率,结果表明,试验所用的 2 种沉淀方解石可以有效地控制厌氧状态下底泥磷的释放,而石灰石覆盖抑制底泥磷释放的效果较差.总的来说,目前国内外对于方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响因素仍然缺乏足够的了解和认识.为此,本研究通过摇床振荡试验和底泥磷释放控制模拟试验,较为系统地考察了方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响因素,包括覆盖系统厚度、上覆水 Ca^{2+} 浓度、温度、方解石粒径以及人工曝气等,以期为地表水体底泥污染物的释放控制提供理论指导和技术支撑.

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[20]推荐的方法测定.底泥的性质见参考文献[21].方解石购自浙江长兴南方微粉厂,4 种粒径:300、800、1 500 和 2 000 目.

1.2 试验方法

1.2.1 方解石固定磷酸盐试验

(1)静态平衡试验 称取 2.0 g 方解石于具塞锥形瓶中,加入 $c(\text{Ca}^{2+}) = c(\text{HCO}_3^-) = 0$ 及 pH 值为 7.5(采用 NaOH 和 HCl 调节)的初始磷浓度为 10 mg/L KH_2PO_4 溶液 100 mL,置于摇床上振荡(速度 150 r/min,保持恒温)48 h 后离心分离,采用钼锑抗比色法测定上清液磷酸盐浓度.

(2)动力学试验 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)的初始磷浓度为 10 mg/L KH_2PO_4 溶液 200 mL 后,置于摇床上振荡(速度 150 r/min,温度 25℃),每间隔一定时间取 20 mL 溶液,经离心分离后再采用钼锑抗比色法测定上清液磷酸盐浓度.

1.2.2 方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放的模拟试验

采用 1 L 广口棕色试剂瓶(直径 10 cm)作为底泥模拟释放试验的反应器,将完全混合均匀的新鲜底泥自反应器顶部加入,使底泥层厚度保持约为 4 cm,并用黑纸遮住反应器以避免阳光的影响.通过控制不同的条件研究覆盖系统厚度、上覆水 Ca^{2+} 浓度、温度、方解石粒径以及人工曝气对方解石活性

覆盖系统抑制底泥磷释放的影响.① 覆盖层厚度:设计 4 种方解石(粒径 300 目)投加量,分别为 100、150、200 和 300 g,即等同于 12.7、19.1、25.5 和 38.2 kg/m^2 .② 上覆水 Ca^{2+} 浓度的影响:上覆水初始 HCO_3^- 浓度为 2 mmol/L, Ca^{2+} 初始浓度分别为 1、2 和 5 mmol/L,方解石(粒径 300 目)投加量 150 g.③ 温度的影响:分别考察 100 g 和 200 g 方解石(粒径 300 目)覆盖作用下温度(10 ~ 15℃ 和 30℃)对底泥磷释放的影响.④ 粒径的影响:方解石的粒径分别为 300 目和 800 目,方解石投加量为 100 g.模拟期间上覆水保持厌氧状态(氮气吹脱).每间隔一定的时间取各模拟反应器上覆水采用钼锑抗比色法测定总磷浓度,采用纳氏试剂法测定氨氮浓度,并采用紫外分光光度法测定硝态氮浓度.

2 结果与讨论

2.1 方解石固定磷酸盐性能分析

2.1.1 温度对方解石固定磷酸盐性能的影响

图 1 为温度对方解石固定磷酸盐效率的影响[反应时间为 48 h, pH 为 7.5, $c(\text{Ca}^{2+}) = c(\text{HCO}_3^-) = 0$, 初始磷浓度 10 mg/L].从图 1 可以看出,随着温度的升高,方解石对磷酸盐的去除效率逐渐提高,15℃ 时方解石对磷酸盐的去除率为 35%,到 25℃ 时增加到 78%,而到 30℃ 条件下去除率则达到了 90% 左右.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($\text{SI}_{\text{CaCO}_3}$)决定了方解石去除水中磷酸盐的机制:当 $\text{SI}_{\text{CaCO}_3} \geq 0$ 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 $\text{SI}_{\text{CaCO}_3} < 0$ 时,方解石对磷酸盐的去除主要通过吸附和结晶作用,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, 17-18].溶液温度的升高,一方面加速了方解石的溶解,使得 Ca^{2+} 的溶出速率加快,另一方面亦使得离子的运动速率加大,离子之间有效碰撞的几率增大,使得以方解石为结晶核的钙磷化合物的结晶速率增大,从而导致方解石固定磷酸盐的效率明显提高.

2.1.2 粒径及反应时间对方解石固定磷酸盐性能的影响

图 2 为不同粒径条件下方解石固定磷酸盐的动力学曲线(试验条件为 200 mL 溶液、方解石 2.0 g 和初始磷浓度为 10 mg/L).从图 2 可以看出,方解石与磷酸盐的反应时间越长,方解石对磷酸盐的去除效

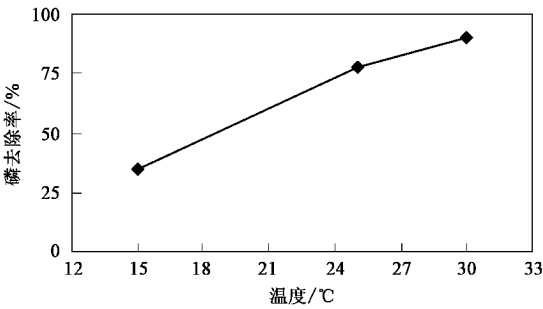


图 1 温度对方解石固定磷酸盐的影响

Fig.1 Effect of temperature on phosphorus removal by calcite

果越好.从图 2 还可以看出,粒径对方解石的除磷效率影响较大:初始阶段(0~8 h),粒径越小,方解石对磷酸盐的去除效果越好.原因可能是:一方面,方解石的溶解受粒径的影响,粒径越小,方解石的Ca²⁺释放速度越快^[18];另一方面,粒径大小直接影响钙磷化合物的结晶速率,结晶过程的初期阶段方解石粒径越小,结晶速度越快,从而使得初期阶段粒径越小的方解石对磷酸盐的去除效果越好.随着反应时间的延长,粒径较大方解石对磷酸盐的去除率逐渐超过了粒径较小的方解石,到第 20 h 时 300 目方解石对磷酸盐的去除率超过了 800 目和1 500目方解石对磷酸盐的去除率,到第 48 h 300 目方解石对磷酸盐的去除率甚至超过2 000目的方解石.分析原因可能是:反应后期阶段,粒径较大方解石表面较快得形成钙磷化合物结晶体层,导致反应后期阶段粒径较大的方解石对磷酸盐的去除速率反而超过了粒径较小的方解石^[14,22].

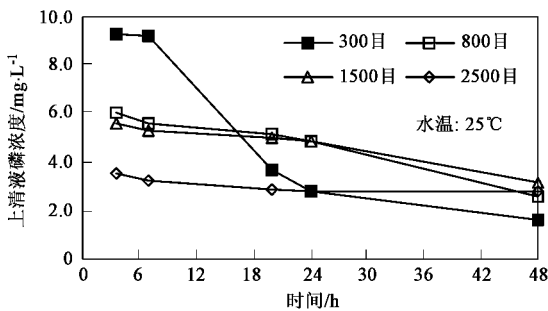


图 2 不同粒径方解石去除磷酸盐的动力学曲线

Fig.2 Kinetic of phosphorus removal by calcite with different grain sizes

2.2 方解石覆盖抑制底泥磷释放的影响因素分析

2.2.1 厌氧条件下底泥磷的释放过程

图 3 为厌氧条件下底泥总磷的释放规律.从图 3 可以看出,厌氧条件下底泥磷逐渐释放出来,上覆

水的总磷浓度到第 5 d 增加到 1.13 mg/L,到第 30 d 增加到 4.23 mg/L,到第 72 d 再逐渐增加的 7.30 mg/L.原因可能主要是厌氧条件下不溶性 Fe(OH)₃ 会变成可溶性的 Fe(OH)₂,可使与铁结合的磷大量进入水体^[23~25].采用文献[21]所介绍的公式计算得到模拟期间底泥磷的平均释放速率,结果见表 1.从表 1 可以看出,厌氧条件下模拟释放开始阶段底泥磷的释放速率较大,随后底泥磷的释放速率逐渐下降,模拟期间底泥磷的平均释放速率为 10.2 mg/(m²·d).

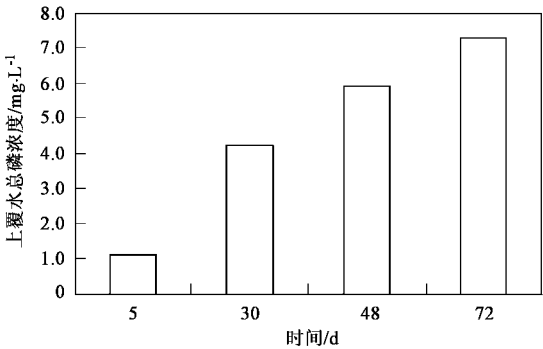


图 3 厌氧条件下底泥磷的释放过程

Fig.3 Phosphorus release from sediments under anaerobic conditions

表 1 厌氧条件下底泥磷的平均释放速率

模拟时间/d	0~5	5~30	30~48	48~72	平均值
释放速率/ mg·(m ² ·d) ⁻¹	18.6	9.9	7.3	4.3	10.2

2.2.2 覆盖系统厚度的影响

图 4 为不同厚度方解石覆盖系统作用下底泥总磷的释放规律.从图 4 可以看出,方解石覆盖可以较好地抑制底泥磷的释放,到模拟释放结束(第 72 d) 100 g 方解石覆盖对底泥磷释放的抑制率达到 56% 左右.从图 4 还可以看出,厚度对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放的效率影响较大,覆盖系统越厚,抑制底泥磷释放的效率越高.方解石投加量由 100 g 增加到 150 g 再增加到 200 g,到第 72 d 上覆水的总磷浓度则由 3.21 mg/L 逐渐下降到 2.74 mg/L 再下降到 1.82 mg/L,对应的覆盖系统对底泥磷释放的抑制率则由 56% 增加到 62% 再增加到 75%,而 300 g 方解石覆盖作用下上覆水的总磷浓度仅为 0.074 mg/L,对应的覆盖系统对底泥磷释放的抑制率高达 99%.原因主要是覆盖系统越厚,厌氧状态下底泥所释放出来的总磷穿过方解石覆盖系统到达上覆水的时间越长,而方解石对磷的去除效率随着时间的延长而

提高,所以方解石覆盖系统越厚会使释放到上覆水的总磷量越少,对底泥磷释放的抑制效果越好.

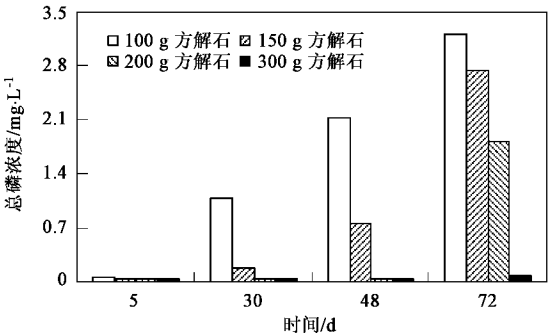


图 4 不同厚度方解石覆盖系统作用下底泥磷的释放规律

Fig.4 Phosphorus release from sediments under calcite barrier

进一步对底泥模拟释放反应器上覆水的 pH 值进行监测分析,结果表明:方解石投加量 0、100、150、200 和 300 g 条件下第 72d 上覆水的 pH 值分别为 7.01、7.00、7.00、7.21 和 7.87,100 g 和 150 g 方解石覆盖作用下上覆水的 pH 值与无覆盖厌氧条件下相比差别不大,而 200 g 和 300 g 方解石覆盖作用下与无覆盖厌氧状态相比,上覆水的 pH 值则分别增加了 0.20 和 0.86.这说明投加量较小的情况下方解石对厌氧条件下上覆水的 pH 值影响不大,而投加量较大的情况下,方解石覆盖增加了上覆水的 pH 值,且方解石覆盖越多,上覆水的 pH 值亦增加越多.

2.2.3 上覆水 Ca^{2+} 的影响

图 5 为上覆水 Ca^{2+} 对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响.从图 5 可以看出,上覆水初始 Ca^{2+} 浓度越高,方解石覆盖对底泥磷释放的抑制效果越好,当初始 HCO_3^- 浓度为 2 mmol/L 条件下,上覆水的初始 Ca^{2+} 浓度从 1 mmol/L 增加到 5 mmol/L,对应的第 72 d 上覆水总磷浓度则由 2.10 mg/L 下降到 1.34 mg/L,上覆水总磷浓度的下降幅度达到 36% 左右.原因主要是 Ca^{2+} 会促进方解石对底泥所释放出来的磷酸盐的去除,且 Ca^{2+} 浓度越高,方解石对磷酸盐去除的促进作用越强^[22].因此,可以通过增加上覆水体的 Ca^{2+} 浓度以提高方解石覆盖系统对底泥磷释放控制的效率.

2.2.4 温度的影响

图 6 为温度对厌氧条件下底泥磷释放速率影响的结果(第 14 d).从图 6 可以看出,温度越高,厌氧条件下底泥磷的释放速率越大,30℃ 条件下上覆水第 14 d 的总磷浓度明显高于 10~15℃ 条件下的上覆水总磷浓度.原因可能是:温度升高加快了底泥微

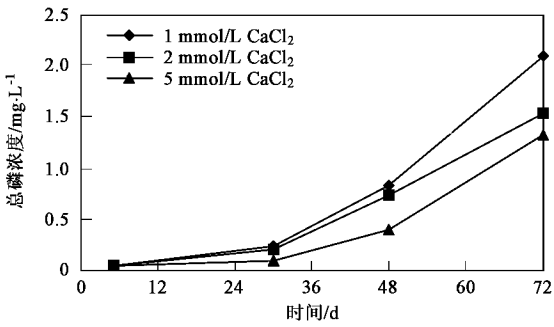


图 5 上覆水 Ca^{2+} 浓度对方解石控制底泥磷释放的影响

Fig.5 Effect of Ca^{2+} on efficiency of calcite to control phosphorus release from sediments

生物和生物体的活动,一方面使更多的 Fe^{3+} 转换为 Fe^{2+} ,从而使与 Fe^{3+} 结合的磷酸盐更多的得到释放;另一方面,微生物活动亦加速了底泥有机磷向无机磷转换^[23~25].温度对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响则比较复杂:一方面,温度越高,底泥总磷的释放速率越大(见图 6),另一方面,温度越高,方解石对磷酸盐的去除效率亦越高(见图 1).温度对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响主要取决于温度对底泥磷释放和方解石固定磷酸盐影响大小的对比:当温度对底泥的影响超过对方解石的影响的时候,温度升高对覆盖系统控制底泥磷释放是不利的,反之则有利.

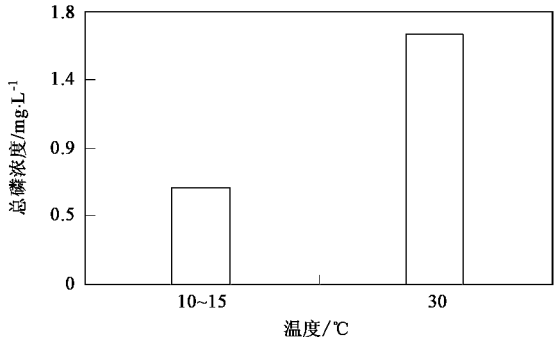


图 6 温度对底泥总磷释放的影响

Fig.6 Effect of temperature on phosphorus release from sediments

图 7 为 10~15℃ 和 30℃ 条件下方解石覆盖系统对底泥磷释放的控制效率.从图 7 可以看出,100 g 方解石覆盖作用下,30℃ 与 10~15℃ 相比,底泥释放更多的磷进入到上覆水体,而 200 g 方解石作用下,30℃ 和 10~15℃ 相比,模拟期间上覆水的总磷浓度均处于较低水平($\leq 0.03 \text{ mg/L}$).与高温(30℃)条件相比,低温(10~15℃)条件下 100 g 方解石覆盖系统控制底泥磷释放效果更好,原因主要是低温条件

下底泥磷释放强度低的缘故.而对于 200 g 方解石覆盖系统,底泥所释放出来的磷酸盐与覆盖的方解石反应较充分,从而导致低温(10 ~ 15℃)与高温(30℃)条件下 200 g 方解石覆盖系统模拟期间均可以有效地抑制底泥磷的释放.

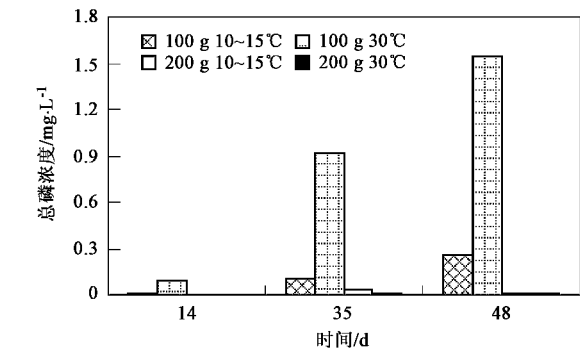


图 7 温度对方解石抑制底泥磷释放的影响

Fig.7 Effect of temperature on efficiency of calcite to control phosphours release from sediments

2.2.5 方解石粒径的影响

图 8 为粒径对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放效率的影响(第 20 d).从图 8 可以看出,粒径对方解石覆盖系统控制底泥磷释放的短期效果影响较大,且方解石粒径越小,模拟期间覆盖系统对底泥磷释放的控制效果越好(300 目方解石 100 g 覆盖条件下第 20 d 的上覆水总磷浓度为 0.357 mg/L,而覆盖 800 目方解石 100 g 条件下第 20 d 的上覆水总磷浓度仅为 0.010 mg/L).原因可能是:方解石与磷酸盐反应的初始阶段,粒径越小,方解石对磷酸盐的固定作用越强.而粒径对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放长期效率的影响有待于进一步的研究.

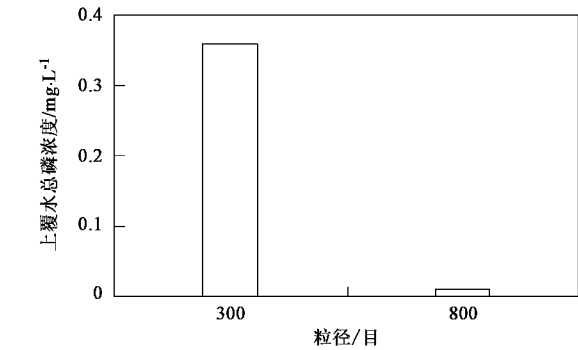


图 8 粒径对方解石控制底泥磷释放的影响

Fig.8 Effect of grain size on efficiency of calcite to control phosphorus release from sediments

2.2.6 人工曝气的影响

图 9 为人工曝气对方解石覆盖系统抑制底泥磷释放效率影响的结果.从图 9 可以看出,方解石覆盖系统厌氧条件下抑制底泥总磷释放的效率明显低于曝气条件下覆盖系统对底泥总磷释放的抑制效率(曝气条件与厌氧条件相比,方解石覆盖作用下的上覆水总磷浓度第 30、48 和 72 d 分别下降了 61%、78% 和 91%).

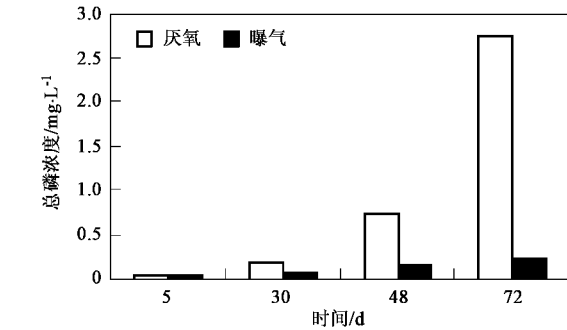


图 9 曝气对方解石抑制底泥磷释放效率的影响

Fig.9 Effect of aeration on calcity barrier to control phosphorus release from sediments

图 10 为人工曝气对方解石覆盖系统作用下底泥氨氮和硝态氮释放的影响.从图 10 可以看出,对于厌氧状态,方解石覆盖系统作用下底泥释放大量的氨氮进入上覆水体,导致上覆水体的氨氮浓度处于较高的水平(第 115 d 上覆水的氨氮浓度达到 36.6 mg/L),而通过对方解石覆盖系统表面进行人工曝气,可以使得底泥所释放出来的氨氮转换为硝态氮,从而导致曝气条件下第 115 d 上覆水的氨氮浓度处于较低的水平(厌氧条件下第 115 d 的上覆水氨氮浓度仅为 1.2 mg/L).从图 10 还可以看出,曝气条件下的氨氮和硝态氮浓度之和远远小于厌氧条件下的氨氮和硝态氮浓度之和,说明由氨氮转化过来的硝态氮会逐渐被底泥通过反硝化作用所消耗或者通过浓度差作用进入底泥.

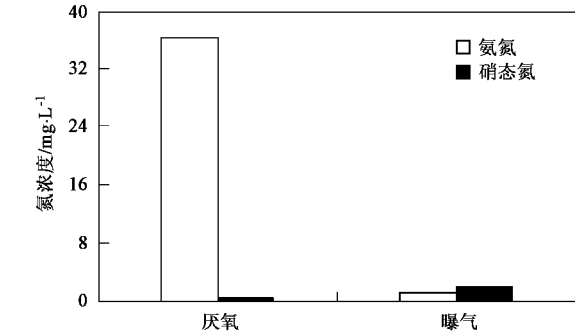


图 10 曝气对方解石覆盖系统作用下底泥氮释放的影响(第 115 d)

Fig.10 Effect of aeration on nitrogen release from sediments

结合人工曝气对方解石覆盖系统作用下底泥氮氮和硝态氮释放影响的规律,可以认为人工曝气强化方解石覆盖系统抑制底泥磷释放效率的原因可能是:一方面,人工曝气可以使底泥所释放出来的氮氮转换为硝态氮,而硝态氮进入底泥会抑制底泥磷的释放^[26,27];另一方面,曝气使上覆水保持好氧状态,溶解氧通过方解石覆盖层到达底泥表面,亦会抑制底泥总磷的释放^[23~25]。

3 结论

(1)方解石覆盖系统可以抑制厌氧状态下底泥磷的释放,且抑制效果受覆盖系统厚度、上覆水 Ca^{2+} 浓度、温度、方解石粒径及人工曝气等的影响。

(2)方解石投加量由 12.7 kg/m^2 增加到 38.2 kg/m^2 ,模拟期间覆盖系统对底泥磷释放的抑制率则由 56% 增加到 99%;上覆水的 Ca^{2+} 会增强方解石覆盖系统对底泥磷释放抑制的效率,上覆水 Ca^{2+} 浓度由 1 mmol/L 增加到 5 mmol/L ,模拟期间上覆水的磷浓度下降 36% 左右。

(3)对于方解石投加量较少的情况下,高温条件与低温条件相比,底泥向上覆水释放更多的磷,而通过增加覆盖系统厚度可以消除高温的不利影响;方解石覆盖系统对底泥磷释放的抑制效率随粒径的减小而增强;对方解石覆盖系统表面进行人工曝气,不仅可以降低底泥氮氮的释放速率,而且还可以降低底泥磷的释放速率。

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研究进展[J]. 环境保护科学, 2004, 30(126): 30-35.

[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] 孙傅,曾思育,陈吉宁. 富营养化湖泊底泥污染控制技术评估[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 61-64.

[5] 宁寻安,陈文松,李萍,等. 污染底泥修复治理技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(9): 99-102.

[6] 薛传东,杨浩,刘星. 天然矿物材料修复富营养化水体的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 381-385.

[7] 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.

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

[9] Azcue J M, Zeman A J, Mudroch A, *et al.* Assessment of

sediment and porewater after one year of subaqueous capping of contaminated sediments in Hamilton Harbour, Canada [J]. Water Science and Technology, 1998, 37(6-7): 323-329.

[10] Bona F, Cecconi G, Maffiotti A. An integrated approach to assess the benthic quality after sediment capping in Venice lagoon [J]. Aquatic Ecosystem Health and Management, 2000, 3: 379-386.

[11] Liu C H, Jennifer A J, Raveendra I, *et al.* Capping Efficiency for Metal-contaminated Marine Sediment under Conditions of Submarine Groundwater Discharge [J]. Environ Sci Technol, 2001, 35: 2334-2340.

[12] Mohan R K, Brown M P, Barnes C R. Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments [J]. Applied Ocean Research, 2000, 22: 85-93.

[13] 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.

[14] 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.

[15] Donnert D, Salecker M. Elimination of phosphorus from municipal and industrial waste water [J]. Water Science Technology, 1999, 40 (4-5): 195-202.

[16] Berg U, Donnert D, Ehbrecht A, *et al.* "Active filtration" for the elimination and recovery of phosphorus from waste water [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochem Eng Aspects, 2005, 265: 141-148.

[17] 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.

[18] 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.

[19] Barry T H, Simon R, Robert J, *et al.* Active barrier to reduce release from sediments: effectiveness of three forms of CaCO_3 [J]. Aust J Chem, 2003, 56: 207-217.

[20] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[21] 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.

[22] 林建伟,朱志良,赵建夫. 方解石去除水中磷酸盐的影响因素研究 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(15): 67-70.

[23] 韩沙沙,温琰茂. 富营养化水体沉积物中磷的释放及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(2): 98-101.

[24] 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.

[25] 侯立军,刘敏,许世远. 环境因素对苏州河市区段底泥内源磷释放的影响 [J]. 上海环境科学, 2003, 22(4): 258-260.

[26] Foy R H. Suppression of phosphorus release from lake sediments by the addition of nitrate [J]. Water Research, 1986, 20(11): 1345-1351.

[27] Gerlinde W, Thomas G, Peter C, *et al.* P-immobilisation and phosphatase activities in lake sediment following treatment with nitrate and iron [J]. Limnologia, 2005, 35: 102-108.