

负载硝酸盐有机改性沸石抑制底泥氮磷释放的效果及机制研究

林建伟^{1,2}, 朱志良^{2*}, 赵建夫², 张宏华³, 詹艳慧⁴

(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. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310032; 4. 上海川吉投资管理有限公司, 上海 200235)

摘要:通过摇床振荡试验研究, 考察 HDTMA 有机改性沸石对硝态氮的吸附-解吸特性及对磷酸盐和氨氮的吸附特性, 再通过模拟释放试验考察负载硝酸盐 HDTMA 有机改性沸石对底泥氮磷释放的影响. 结果表明: ① 有机改性沸石吸附硝态氮的最佳 HDTMA 负载量为 276% ECEC. Langmuir 公式能较好地描述有机改性沸石对硝态氮的吸附行为, 饱和单位吸附量达到 1 724 mg/kg, 并且有机改性沸石对硝态氮的吸附速率较快. 有机改性沸石吸附硝态氮之后一定条件下又会逐渐释放出来, 并且吸附的硝态氮越多, 硝态氮的解吸量越大. Langmuir 公式能较好地描述负载硝态氮之后有机改性沸石对磷和氨氮的吸附行为, 且对氨氮的理论吸附量为 12.0 mg/g 以及对磷的理论吸附量为 0.597 mg/g. ② 采用有机改性沸石负载硝酸盐可以较长时间地向表层底泥提供硝态氮, 并且大大减低了进入上覆水的硝态氮比例. 硝酸盐负载型有机改性沸石不仅可以有效控制底泥磷的释放, 而且可以控制底泥氨氮的释放.

关键词:底泥; 氮磷; HDTMA 有机改性沸石; 硝酸盐

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)02-0356-06

Efficiency and Mechanics of Surfactant Modified Zeolite with Nitrate Adsorbed to Control Nitrogen and Phosphorus Release from Sediments

LIN Jian-wei^{1,2}, ZHU Zhi-liang², ZHAO Jian-fu², ZHANG Hong-hua³, ZHAN Yan-hui⁴

(1. School of Marine Science & Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China; 2. School of Environmental Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Biological & Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 4. Shanghai Chuanji Investment Management Co., Ltd., Shanghai 200235, China)

Abstract: Efficiency and mechanics of surfactant modified zeolite (SMZ) with nitrate adsorbed to control nitrogen and phosphorus release from sediments were researched. The results show that: ① The optimal level of HDTMA adsorbed on SMZ for nitrate sorption was 276% ECEC. The sorption of nitrate on SMZ can be well described by the Langmuir sorption isotherm, and the sorption capacity was 1 724 mg/kg. The nitrate sorption on SMZ was quick and the nitrate adsorbed on SMZ can be released. The sorption of ammonia and phosphorus on SMZ with nitrate adsorbed can also be well described by the Langmuir sorption isotherm, and the sorption capacity of ammonia and phosphorus are 12.0 mg/g and 0.597 mg/g respectively. ② The barrier of SMZ with nitrate adsorbed can provide nitrate for surface sediments for a long time, and the quantity of released nitrate in overlying water was much less than that of nitrate directly added. This barrier can not only efficiently control ammonia release from sediments, but also control phosphorus release from sediment efficiently.

Key words: sediments; nitrogen and phosphorus; surfactant modified zeolite; nitrate

底泥是地表水体营养物质的重要蓄积库. 来自各种途径的营养物质, 经过一系列的物理、化学及生物作用, 其中部分营养盐会沉积于地表水体的底部, 成为地表水体营养物质的内负荷^[1,2]. 而一定条件下, 部分营养盐又可以从底泥当中重新向上覆水体释放, 使上覆水体的营养物质浓度增加, 成为上覆水体营养物质的内污染源^[3~11]. 因此, 有效控制底泥营养盐的释放, 对于我国地表水环境富营养化的防治具有重要的意义. 向底泥注入硝酸盐, 不仅可以通过反硝化作用使底泥有机物得以去除, 而且还可以阻止 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 的减少及促使 Fe^{3+} 的生成, 进而达

到底泥磷释放控制的目的, 是目前受到国内外广泛重视的一种底泥污染原位控制技术^[12~24]. 投加硝酸盐控制底泥磷释放的一个缺点是表层底泥利用硝态氮的持续时间比较短(因为硝酸盐极易溶于水), 这会影响该技术控制底泥磷释放的效率^[25~28]. 已有研

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

究表明:HDTMA 有机改性沸石可以吸附硝态氮,并且所吸附的硝态氮一定条件下又会释放出来^[29].所以,采用预先吸附硝态氮的有机改性沸石覆盖于底泥表面,可能可以较长时间地向表层底泥提供硝态氮.为此,本研究考察了 HDTMA 有机改性沸石对硝态氮的吸附-解吸特性,并通过模拟释放试验考察了负载硝酸盐 HDTMA 有机改性沸石控制底泥氮磷释放的效果,以期到底泥的污染控制提供理论和技术支撑.

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、总磷和有机质采用采用文献[30]推荐的方法测定.底泥和天然沸石的性质见文献[31].天然沸石改性前先对粒径 3~5 mm 沸石进行破碎再过 100 目筛,粒径 ≤ 100 目天然沸石的外部阳离子交换容量(extmal cation exchange capacity, ECEC)为 145 mmol/kg.

1.2 试验方法

1.2.1 天然沸石的表面活性剂改性

采用溴化十六烷基三甲基铵(HDTMA-Br)对粒径 ≤ 100 目的天然沸石进行改性.改性过程为:先加 5.0 g 沸石于 50 mL 的离心管中,再分别加入 100 mmol/L 的 HDTMA 溶液 10、15、17.5、20、25 和 30 mL,即加入的 HDTMA 量等同于沸石 ECEC 的 138%、207%、241%、276%、345% 和 414%.再置于摇床上以 150 r/min 振荡 24 h 之后,以 5 000 r/min 的速度离心 20 min,倾上去清液,再加入去离子水重复洗涤 5 遍之后自然风干.

1.2.2 有机改性沸石对硝态氮的等温吸附-解吸及动力学试验

等温吸附:称取 0.2 g 最佳 HDTMA 负载量有机改性沸石置于 50 mL 的离心管,再加入硝态氮浓度分别为 5、10、15、20、25、30 和 40 mg/L 的 KNO_3 溶液 20 mL,以 150 r/min 振荡 24 h 之后再以 5 000 r/min 离心倾出上清液,再采用紫外分光光度法测定上清液的硝态氮浓度.

解吸试验:上述已经倾出上清液的离心管中加入 20 mL 的去离子水,以 150 r/min 振荡 24 h,再以

5 000 r/min 离心之后倾出上清液,采用紫外分光光度法测定上清液的硝态氮浓度.重复上述过程 4 次.

动力学试验:称取 1.0 g 最佳 HDTMA 负载量有机改性于锥形瓶中,再加入硝态氮初始浓度为 100 mg/L 的 KNO_3 溶液 100 mL,每间隔一定的时间取 2 mL 上清液,再采用紫外分光光度法分析上清液的硝态氮浓度.

1.2.3 有机改性沸石的硝态氮负载

称取 200 g 最佳 HDTMA 负载量有机改性沸石置于试剂瓶中,再加入硝态氮浓度为 1 000 mg/L 的硝酸盐溶液 1 L,置于摇床上(转速 150 r/min)反应 24 h 之后再离心分离,再采用紫外分光光度法测定上清液的硝态氮浓度,有机改性沸石负载硝态氮之后自然风干备用.经计算得到有机改性沸石的硝态氮负载量为 1.69 mg/g.

1.2.4 硝酸盐负载有机改性沸石控制底泥氮磷释放的模拟试验

采用实验室模拟研究了负载硝态氮的有机改性沸石控制底泥氮磷释放的效果.底泥样品自然风干破碎过 10 目之后,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免阳光的影响,再分别对底泥加以不同的处理,分为 4 个方案,即方案 1 为无覆盖作为空白对照,方案 2~4 分别投加 20、30 和 50 g 的硝酸盐负载型有机改性沸石.反应器采用 1L 的棕色试剂瓶(直径约 10 cm).模拟开始前采用氮气吹脱使上覆水保持厌氧状态.模拟期间取各模拟反应器上覆水测定总磷浓度(钼锑抗比色法)、氨氮浓度(纳氏试剂比色法)以及硝态氮浓度(紫外分光光度法).

2 结果与讨论

2.1 有机改性沸石对硝态氮的吸附-解吸特性

2.1.1 HDTMA 负载量对有机改性沸石吸附硝态氮性能的影响

天然沸石对硝酸盐的吸附能力较差,而采用十六烷基三甲基溴化铵(HDTMA-Br)进行改性可以提高沸石对硝酸盐的吸附能力^[29].HDTMA 沸石改性的机制为:当 HDTMA 投加量较少时,HDTMA 带正电荷的头基(N 端)仅与沸石表面的带负电荷的吸附活性点通过库仑静电引力发生作用,使沸石表面形成单层或半胶束的表面活性剂膜;当 HDTMA 投加量较多时,沸石表面形成了呈双分子层或近似双分子层的带正电荷的聚状态^[32~37].为此,通过试验考察了 HDTMA 负载量对有机改性沸石吸附硝态氮的影

响(硝态氮初始浓度 100 mg/L,沸石投加量 0.25 g,溶液体积 20 mL),结果见图 1.从图 1 可以看出,当负载量低于 ECEC 276%时,随着 HDTMA 投加量的增加,有机改性沸石对硝态氮的吸附量随之增加,这是因为随着 HDTMA 负载量的增加会使沸石表面正电荷增加的缘故;而当 HDTMA 负载量高于 ECEC 276%时,随着 HDTMA 投加量的增加,有机改性沸石对硝态氮的吸附能力非但不会提高,反而会出现一定程度的下降.综上所述,有机改性沸石吸附硝态氮的最佳负载量为 ECEC 276%.

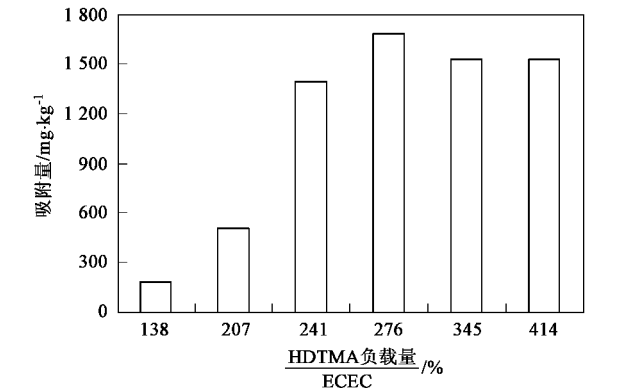


图 1 HDTMA 负载量对有机改性沸石吸附硝态氮的影响
Fig.1 Effect of HDTMA loading on nitrate sorption of SMZ

2.1.2 有机改性沸石对硝态氮的等温吸附曲线及动力学曲线

图 2 为最佳 HDTMA 负载量条件下有机改性沸石吸附硝态氮的等温吸附曲线.从中可以看出,随着硝态氮初始浓度的增加,有机改性沸石对硝态氮的吸附量随之增加.采用 $c/q = c/q_m + 1/(q_m \cdot K)$ (式中, q 为单位吸附量, mg/kg ; q_m 为饱和单位吸附量, mg/kg ; c 为平衡浓度, mg/L ; K 为常数, L/mg)对图 2 的试验数据进行拟合,结果见表 1.表 1 的结果表明:Langmuir 公式能较好地描述有机改性沸石对硝态氮的吸附行为,理论吸附量达到 $1\,724\text{ mg/kg}$, K 为 0.224 L/mg .

表 1 有机改性沸石对硝态氮等温吸附的拟合结果(25℃)

Table 1 Fitting results of nitrate isotherm sorption on SMZ(25℃)

$q_0/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$K/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	相关系数 R^2
1 724	0.224	0.994

图 3 为有机改性沸石吸附硝态氮的动力学曲线.从图 3 可以看出,试验条件下,经过 15 min 的反应,上清液的硝态氮浓度由最初的 100 mg/L 下降到

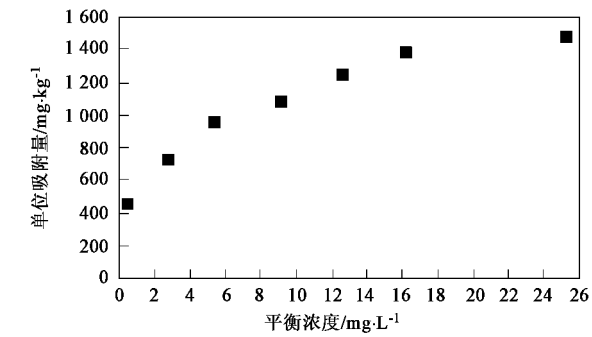


图 2 有机改性沸石吸附硝态氮的等温吸附曲线
Fig.2 Isotherm sorption curve of nitrate on SMZ

80.7 mg/L,此后上清液的硝态氮浓度变化不是很明显,第 20 ~ 50 min 之间,上清液的硝态氮浓度于 80.6 ~ 81.5 mg/L 之间波动,说明有机改性沸石吸附硝态氮的速度较快.

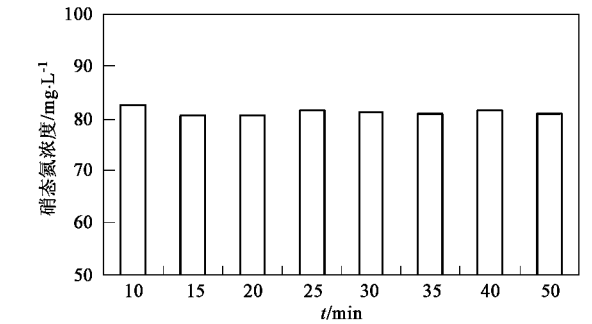


图 3 有机改性沸石吸附硝态氮的动力学
Fig.3 Kinetic of nitrate sorption on SMZ

2.1.3 有机改性沸石吸附硝态氮之后的解吸特征

表 2 为最佳负载量条件下有机改性沸石吸附硝态氮之后的解吸特征.从表 2 可以看出,初始有机改性沸石硝态氮负载量 454 ~ 1 477 mg/kg 条件下,第 1 ~ 4 次的硝态氮解吸率分别为 2.2% ~ 15.8%、8.5% ~ 19.7%、4.5% ~ 14.9% 和 4.5% ~ 14.8%,总解吸率为 25.7% ~ 62.4%,且从总体上看单次硝态氮解吸率和 4 次硝态氮的总解吸率随着初始硝态氮负载量的增加而增大.

2.2 负载硝态氮有机改性沸石对磷和氨氮的吸附特性

图 4 和图 5 分别为负载硝态氮之后的有机改性沸石对磷酸盐和氨氮的等温吸附曲线.采用公式 $c/q = c/q_m + 1/(q_m \cdot K)$ 对图 4 和图 5 的试验数据进行拟合,结果见表 3.从表 3 可以看出,Langmuir 公式能很好地描述负载硝态氮之后有机改性沸石对磷和氨氮的吸附行为,且对氨氮的单位饱和吸附量为

12.0 mg/g 以及对磷的单位饱和吸附量为 0.597 mg/g,表明负载硝酸盐有机改性沸石对氨氮的吸附能力仍然较大,而且具备较强地吸附磷酸盐的能力.

表 2 硝酸盐负载有机改性沸石的解吸率/%

初始负载量 /mg·kg ⁻¹	解吸次数				总解吸率
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	
454	2.2	8.5	7.6	7.5	25.7
724	7.9	8.3	4.5	14.8	35.5
959	9.9	10.1	7.6	4.5	32.1
1 082	12.2	13.4	11.8	6.2	43.7
1 243	12.7	11.1	6.6	5.8	36.3
1 385	15.8	11.9	11.5	9.1	48.2
1 477	15.3	19.7	14.4	13.0	62.4

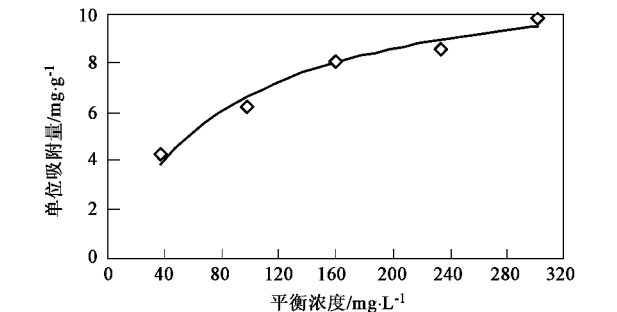


图 4 负载硝态氮的有机改性沸石对氨氮的等温吸附曲线
Fig.4 Isotherm sorption of ammonia on SMZ with nitrate adsorbed

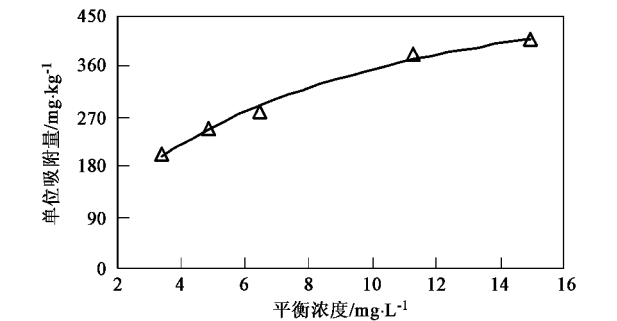


图 5 负载硝态氮的有机改性沸石对磷酸盐的等温吸附曲线
Fig.5 Isotherm sorption of phosphorus on SMZ with nitrate adsorbed

表 3 有机改性沸石对磷酸盐和氨氮等温吸附的拟合结果(25℃)

Table 3 Fitting results of isotherm sorption of phosphorus and ammonia on SMZ(25℃)			
项目	$q_0/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$K/\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}$	相关系数 R^2
氨氮吸附	12.0	0.012 7	0.988
磷酸盐吸附	0.597	0.147	0.994

2.3 负载硝酸盐有机改性沸石控制底泥氮磷释放的效果

2.3.1 负载硝酸盐有机改性沸石覆盖对上覆水硝态氮浓度的影响

图 6 为负载硝酸盐有机改性沸石覆盖作用下上覆水硝态氮浓度的变化.从图 6 可以看出,开始阶段(0~7 d)吸附硝态氮之后的有机改性沸石逐渐向上覆水释放出硝态氮,50 g 负载硝酸盐有机改性沸石作用下上覆水硝态氮的浓度由最初的约 0 到第 1 d 的 5.57 mg/L,再到第 7 d 的 11.8 mg/L.这是因为开始阶段上覆水的硝态氮浓度较低,负载硝酸盐有机改性沸石解吸出来的硝态氮通过浓度差扩散作用逐渐进入上覆水体的缘故.从图 6 还可以看出,到第 7 d 上覆水的硝态氮浓度达到最大值,此后上覆水的硝态氮浓度则逐渐下降,这是因为后期阶段一方面负载硝酸盐有机改性沸石释放硝态氮的速度变缓,另一方面已经释放出来到上覆水的硝态氮会进入底泥和通过反硝化作用被消耗.根据有机改性沸石的投加量以及上覆水的体积,可以进一步计算得到负载硝态氮有机改性沸石释放到上覆水的硝态氮量占所投加的总硝态量的比例,结果见图 7.

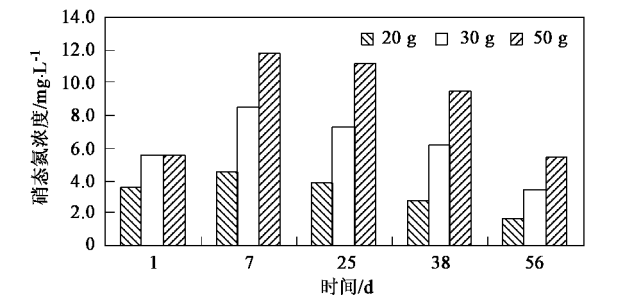


图 6 硝酸盐负载型有机改性沸石作用下上覆水硝态氮浓度的变化
Fig.6 Changing of NO₃-N concentration of overlying water under SMZ barrier with nitrate adsorbed

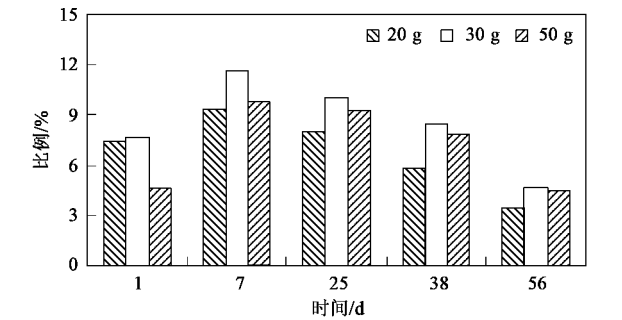


图 7 释放到上覆水的硝态氮量占所投加的总硝态氮的量的比例
Fig.7 Percentage of nitrate in overlying water to all nitrate added

从图 7 可以看出,负载硝酸盐有机改性沸石释放到上覆水的硝态氮仅占所投加的总硝态氮量的小

部分, 20、30 和 50g 负载硝酸盐有机改性沸石经过 1d 的释放到达上覆水的硝态氮比例分别仅为 7.4%、7.7% 和 4.6%, 而到第 7 d 则分别增加到 9.4%、11.7% 和 9.8%, 此后比例则下降. 通过试验还发现, 直接投加硝酸盐于上覆水, 开始阶段会使大部分的硝态氮进入上覆水体, 导致上覆水的硝态氮浓度急剧升高. 因此, 负载硝酸盐的有机改性沸石覆盖于底泥表面, 可以较长时间地向表层底泥提供硝态氮, 并且大大降低了所投加的硝态氮进入上覆水的比例.

2.3.2 负载硝酸盐有机改性沸石控制底泥氨氮释放的效果

图 8 为负载硝酸盐有机改性沸石控制底泥氨氮释放的结果. 从图 8 可以看出, 厌氧状态下底泥会释放出大量的氨氮, 到第 56 d 上覆水的氨氮浓度达到了 22 mg/L, 而投加负载硝酸盐的有机改性沸石则明显降低了底泥氨氮的释放速率, 有机改性沸石投加量 20、30 和 50 g 覆盖作用下到第 56 d 分别抑制了 64%、68% 和 72% 的底泥氨氮释放通量. 原因可能是负载硝酸盐有机改性沸石对氨氮吸附能力较强的缘故.

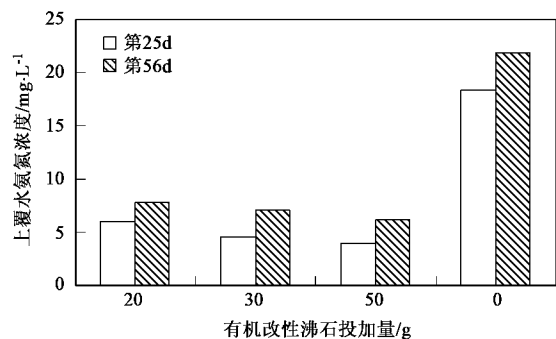


图 8 硝酸盐负载有机改性沸石控制底泥氨氮释放的效果

Fig.8 Efficiency of SMZ with nitrate adsorbed to control ammonia release from sediments

2.3.3 硝酸盐负载有机改性沸石控制底泥磷释放的效果

图 9 为负载硝酸盐有机改性沸石对底泥磷释放影响的结果. 从图 9 可以看出, 厌氧状态下底泥磷会逐渐地释放出来, 这主要是厌氧条件下不溶性的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 会变成可溶性 $\text{Fe}(\text{OH})_2$, 使与铁结合的磷大量地进入水体的缘故^[38,39]. 从图 9 还可以看出, 负载硝酸盐有机改性沸石作用下上覆水的总磷浓度, 远远低于厌氧无覆盖条件下上覆水总磷浓度, 表明负载硝酸盐有机改性沸石可以抑制底泥磷的释放. 原因包括 2 个方面: 一方面, 负载硝酸盐有机改性沸石

可以缓慢释放出硝态氮, 硝态氮存在条件下不仅延缓了 Fe^{3+} 的减少, 而且 Fe^{2+} 还会被硝酸盐氧化 Fe^{3+} , 加强了铁氧化物和水化物对磷的吸附^[26,40], 另一方面有机改性沸石还可以吸附底泥所释放出来磷酸盐.

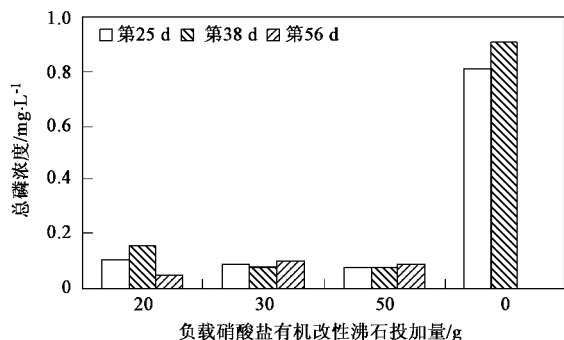


图 9 硝酸盐负载型有机改性沸石对底泥总磷释放的影响

Fig.9 Effect of SMZ with nitrate adsorbed on phosphorus release from sediments

3 结论

(1) 有机改性沸石吸附硝态氮的最佳 HDTMA 负载量为 276% ECEC. Langmuir 公式能较好地描述有机改性沸石对硝态氮的吸附行为, 饱和和单位吸附量达到 1 724 mg/kg, 并且有机改性沸石对硝态氮的吸附速率较快. 有机改性沸石吸附硝态氮之后一定条件下又会逐渐释放出来, 并且吸附的硝态氮越多, 硝态氮的解吸量越大. Langmuir 公式能较好地描述负载硝态氮之后有机改性沸石对磷和氨氮的吸附行为, 且对氨氮的理论吸附量为 12.0 mg/g 以及对磷的理论吸附量为 0.597 mg/g.

(2) 采用有机改性沸石负载硝酸盐可以较长时间地向表层底泥提供硝态氮, 并且大大减低了进入上覆水的硝态氮比例. 硝酸盐负载型有机改性沸石不仅可以有效控制底泥磷的释放, 而且可以控制底泥氨氮的释放.

参考文献:

[1] 包先明, 陈开宁, 范成新, 等. 种植沉水植物和疏浚底泥对氮磷营养水平的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 932-935.
[2] 张丽萍, 袁文权, 张锡辉. 底泥污染物释放动力学研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(2): 22-26.
[3] 秦伯强, 朱广伟, 张路, 等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法——以太湖为例[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(增刊 II): 33-44.
[4] Rydin E, Brunberg A. Seasonal dynamics of phosphorus in Lake Erken surface sediments [J]. Arch Hydrobiol Spec Issues Advanc Limnol, 1998, 51: 157-167.

[5] 高丽, 周健民. 磷在富营养化湖泊沉积物-水界面的循环[J]. 土壤通报, 2004, **35**(4): 512-515.

[6] 秦伯强, 朱广伟. 长江中下游地区湖泊水和沉积物中营养盐的赋存、循环及其交换特征[J]. 中国科学 D 辑, 2005, **35**(增刊 II): 1-10.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 丛海兵, 黄廷林, 李创宇, 等. 于桥水库沉积物内源污染特性研究[J]. 水资源保护, 2006, **22**(4): 20-23, 61.

[10] 梁秀娟, 肖长来, 杨天行, 等. 密云水库中氮分布及迁移影响因素研究[J]. 中国科学 D 辑, 2005, **35**(增刊 I): 272-280.

[11] 刘伟, 陈振楼, 王军, 等. 小城镇河流沉积物无机氮迁移循环研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **12**(3): 520-524.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Ripl W. Biochemical oxidation of polluted lake sediment with nitrate-A new restoration method [J]. Ambio, 1976, **5**: 132-135.

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

[16] Macrae J D, Hall K J. Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) in marine sediment under denitrifying conditions [J]. Water Science and Technology, 1998, **38**(11): 177-185.

[17] Sødergaard M, Jeppesen E, Jensen J P. Hypolimnetic nitrate treatment to reduce internal phosphorus loading in a stratified lake [J]. Lake Reservoir Manage, 2000, **16**(3): 195-204.

[18] 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.

[19] 洪祖喜, 何品晶, 邵立明. 水体受污染底泥原地处理技术[J]. 环境保护, 2002, **10**: 15-17.

[20] 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.

[21] 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.

[22] Babin J, Kau P, Chan L, *et al.* Full-scale in situ sediment treatment to control sulphide odors [A]. In: Remediation of Contaminated Sediments-2003: Proceedings of the Second International Conference on Remediation of Contaminated Sediments [C]. Venice, Italy: 2004. 91-923.

[23] Feilbicke M. Impact of nitrate addition on phosphorus availability in sediment and water column and on plankton biomass-experimental field study in the shallow brackish Schlei fjord (Western Baltic, Germany)[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1997, **99**(1-4): 445-456.

[24] Hansen J, Reitzel K, Jensen H S, *et al.* Effects of aluminum, iron, oxygen and nitrate additions on phosphorus release from the sediment of a Danish softwater lake [J]. Hydrobiologia, 2003, **492**: 139-149.

[25] Gerlinde W, Thomas G, Klaus K, *et al.* Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release [J]. Water Research, 2005, **39**: 494-500.

[26] Gerlinde W, Thomas G, Peter C, *et al.* P-immobilization and phosphates activities in lake sediment following treatment with nitrate and iron [J]. Limnologica, 2005, **35**: 102-108.

[27] Na Y M, Wang S K, Park S S. A mathematical model to estimate nitrate release from ocher pellets applied to anaerobic benthic sediment. Ecological modeling, 2006, **199**: 324-335.

[28] Na Y M, Park S S. Retardation of phosphate release from freshwater benthic sediments by application of ochre pellets with calcium nitrate [J]. Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2004, **39**(6): 1617-1629.

[29] Li Z. Use of surfactant-modified zeolite as fertilizer carriers to control nitrate release [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2003, **61**: 181-188.

[30] 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.

[31] 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.

[32] 张晖, 周明达, 刘国聪. HDTMA-沸石的制法及其去除水中磷酸盐的研究[J]. 广州化学, 2005, **30**(3): 30-34.

[33] 卢晓岩, 朱琨, 梁莹, 等. 改性沸石对水中铬酸盐的吸附和解吸性能研究[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版), 2005, **24**(4): 72-74.

[34] 谢晓凤, 王京刚. 有机沸石处理含铬废水的试验研究[J]. 金属矿山, 2002, **317**(11): 47-49.

[35] 刘莺, 刘学良, 王俊德. 有机沸石对水中 BTEX 及铬酸根离子的吸附[J]. 环境化学, 2003, **22**(4): 373-376.

[36] Bowman R S. Applications of surfactant-modified zeolites to environmental remediation [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2003, **61**: 43-56.

[37] Ghiaci M, Kia R, Abbaspur A, *et al.* Adsorption of chromate by surfactant-modified zeolites and MCM-41 molecular sieve [J]. Separation and Purification Technology, 2004, **40**: 285-295.

[38] 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.

[39] 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.

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