

陈蕾,郑西来,刘杰. 2011. 改性凹凸棒土覆盖抑制底泥磷释放的影响和效果[J]. 环境科学学报, 31(9): 1962-1967

Chen L, Zheng X L, Liu J. 2011. Efficiency of modified attapulgite in controlling phosphorus release from sediment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(9): 1962-1967

# 改性凹凸棒土覆盖抑制底泥磷释放的影响和效果

陈蕾,郑西来\*,刘杰

中国海洋大学环境科学与工程学院,青岛 266100

收稿日期:2010-11-22 修回日期:2010-12-20 录用日期:2010-12-29

**摘要:** 采用等温吸附实验和动力学实验,考察了改性凹凸棒土对磷酸盐的吸附特性. 研究了无覆盖层、沙土覆盖和改性凹凸棒土覆盖对底泥总磷释放的抑制效果,并分析了不同覆盖层厚度、温度和粒径等因素对改性凹凸棒土抑制底泥总磷释放的影响. 研究表明: Freundlich 方程式能较好地描述改性凹凸棒土对磷酸盐的等温吸附行为,可决系数  $R^2$  在 0.98 以上;改性凹凸棒土与磷酸盐的反应速度很快,在 30 min 内基本达到平衡;与未加覆盖层相比,沙土覆盖和改性凹凸棒土覆盖都可以抑制底泥磷的释放,且凹凸棒土覆盖优于沙土覆盖;厚度对改性凹凸棒土覆盖抑制底泥总磷释放的效率影响较大,覆盖层越厚,抑制底泥磷释放的效率越高;高温条件与低温条件相比,底泥向上覆水释放更多的磷;粒径对凹凸棒土覆盖层控制底泥总磷释放存在一定的影响,即粒径越小,控制效果越好.

**关键词:** 底泥; 改性凹凸棒土; 磷; 释放; 覆盖

文章编号: 0253-2468(2011)09-1962-06 中图分类号: X52 文献标识码: A

## Efficiency of modified attapulgite in controlling phosphorus release from sediment

CHEN Lei, ZHENG Xilai\*, LIU Jie

School of Environment Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100

Received 22 November 2010; received in revised form 20 December 2010; accepted 29 December 2010

**Abstract:** The characteristics of adsorption of phosphate on modified attapulgite were investigated through isothermal adsorptive and kinetic experiments. The efficiency of controlling TP release from sediments was studied under the conditions of non-barrier, sand barrier and modified attapulgite barrier. The factors affecting release, including barrier thickness, temperature and grain size, were analysed. The results show that Freundlich isotherm can match the isothermal adsorptive characteristic of phosphate on modified attapulgite with a correlation coefficient of more than 0.98. The reaction between modified attapulgite and phosphate is fast and reaction may reach equilibrium within 30 minutes. Compared to the no-barrier case, both sand and modified attapulgite barriers are able to control the TP release from the sediment, and the former is better than the latter. The barrier thickness is a major factor for the control of phosphorus release. More phosphorus is released with the increase of thickness and temperature. A small grain size of modified attapulgite is beneficial to the control of phosphorus release from the sediment.

**Keywords:** sediment; modified attapulgite; phosphorus; release; barrier

### 1 引言( Introduction)

底泥覆盖是一种原位治理方法,它是指利用干净沉积物、沙子、砾石,甚至土工织物等覆盖在污染沉积物表层处理污染底泥的一种方法(高增文, 2008),是目前受到广泛重视的底泥污染控制技术. 国外学者已经做了一定研究工作,并且开展了工程实践. Jacobs 和 Forstner(1999)提出了活性覆盖层的

概念,活性材料可以通过吸附或共沉淀作用增强覆盖层对沉积物中污染物释放的抑制效果; Barry 等考察了 3 种形式的碳酸钙构造的覆盖层控制底泥磷释放的效率,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,而石灰石对控制底泥磷释放的效果较差(Barry *et al*, 2003). 美国首先开展了覆盖法的工程实践,日本、挪威、加拿大等也相继开展了覆盖法治理底泥污染工程

基金项目: 青岛市水利科技重点项目( No. 2008005)

Supported by the Water Conservancy Technology Program of Qingdao( No. 2008005)

作者简介: 陈蕾(1986—),女, E-mail: chenlei20080726@126.com; \* 通讯作者(责任作者) E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

Biography: CHEN Lei(1986—), female, E-mail: chenlei20080726@126.com; \* Corresponding author E-mail: zhxilai@ouc.edu.cn

(Azcue *et al.*, 1998). 在国内, 采用覆盖技术控制底泥污染的研究和应用还较少, 仍停留在实验探索阶段. 叶恒朋等(2006) 对比分析了粉煤灰、水泥、沸石、河砂和玻璃珠等控制底泥磷释放的效果及机理; 林建伟等研究过采用有机改性沸石、方解石、沸石与方解石组合、硝酸盐和负载硝酸盐改性沸石等多种材料覆盖, 来抑制底泥氮磷释放, 表明上述材料均能不同程度的控制底泥氮或磷的释放(林建伟等 2006—2008).

凹凸棒石(简称凹土)是层链状过渡结构的以含水富镁硅酸盐为主的黏土矿, 具有独特的微观结构、外观形貌以及荷电性质, 且其储量大、价格低、对环境无污染, 是一类很有发展前景的优质廉价吸附剂. 国内外许多学者对凹凸棒土的改性以及用改性复合凹土吸附有机物、重金属离子和氮磷等做了很多研究(Church and Velde, 1979; Cases *et al.*, 1991; 陈天虎, 2000; 张俊, 2006; 包军杰等, 2006; 董庆洁等, 2006; 王雅萍等, 2008), 但将凹土作为覆盖

材料抑制底泥污染物释放还鲜有报道. 为此, 本研究通过批量实验和底泥磷释放控制模拟实验, 系统地考察了改性凹土对抑制底泥磷释放的影响和效果, 可以为地表水体底泥污染物磷的释放控制提供科学依据.

## 2 材料与方法(Materials and methods)

### 2.1 供试底泥

用土样采集器采集莱西市产芝水库的底泥样品, 送至实验室进行底质分析和磷的释放模拟实验. 底泥的分析指标包括含水率 WC、pH 值、有机质、总氮、总磷、氨氮和硝氮. 底泥中有机质含量用烧失重(LOI) 来表示; 含水率为新鲜泥样在 105 °C 下烘干 12 h 前后质量的差值与烘前泥样质量的比值; 底泥 TN 用半微量开氏法测定,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  采用  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  KCl 浸提-靛酚蓝比色法,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  采用酚二磺酸比色法, TP 用  $\text{HClO}_4 \text{-H}_2\text{SO}_4$  法测定(北京林业大学, 2002). 底泥的理化性质见表 1.

表 1 供试底泥的主要理化性质指标

Table 1 Physico-chemical properties of used sediments

WC	pH	LOI	TN /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	TP /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
39.45%	6.94	2.89%	624.4	40.96	0.59	97.02

### 2.2 改性凹土

试验所用凹凸棒土购自安徽明光市曼迪矿业科技有限公司, 粒径分别为 200 目和 400 目. 为了提高凹土的吸附性能, 对其进行了提纯和改性.

将凹土与蒸馏水按 1:10 的比例放入锥形瓶中, 在磁力搅拌器上搅拌 1 h, 然后经超声波分散 30 min. 静置一段时间后, 将上层白色溶液倒入离心管, 在  $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  下离心 20 min. 弃去上清液后所得即为提纯后的凹土. 用激光粒度分析仪对提纯后 200 目和 400 目凹土进行粒度分析, 所得粒径分布见图 1,  $D_{50}$  值分别为  $1.993 \mu\text{m}$  和  $1.442 \mu\text{m}$ .

凹凸棒石晶体结构属 2:1 型黏土矿物, 硅氧四面体夹 1 层镁铝氧八面体, 属层链状结构, 四面体条带间形成的与链平行的通道被水分子填充, 在加热时能脱除晶体结构中不同状态水, 内部结构变得疏松多孔, 从而增加比表面积, 增强吸附力, 因此有必要对其进行改性以增强其吸附性能. 一般凹凸棒石活化温度不宜超过  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 选择  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  左右为宜, 活化时间不宜超过 3 h. 对凹土进行热处理: 取 20 g 凹凸棒石土放入马弗炉内, 在  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  下焙烧 2 h, 冷却

后备用.

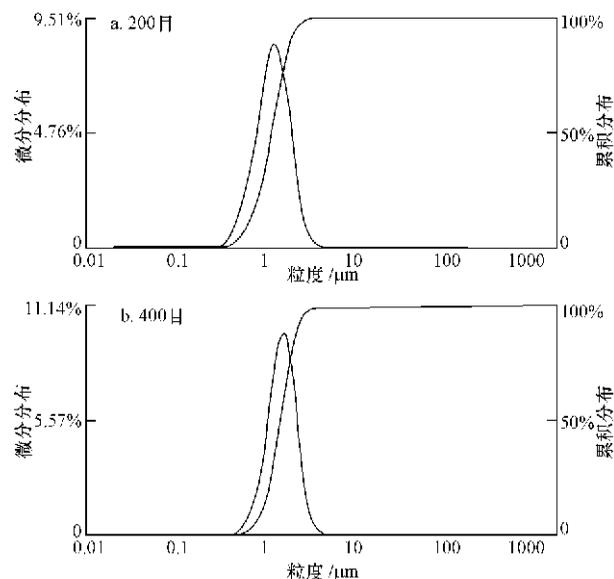


图 1 不同粒径提纯后凹土粒径分布图

Fig. 1 Particle size distribution of purified different mesh attapulgite

## 2.3 试验方法

2.3.1 静态吸附平衡试验 称取7份0.1 g改性凹凸棒土,分别置于锥形瓶中,加入不同浓度(1、5、10、15、20、30、40  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的磷酸盐溶液30 mL,在25℃条件下置于250  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温振荡器中,振荡12 h后,过滤,取上清液,用钼锑抗分光光度法测定平衡磷酸盐浓度.以差减法点定吸附平衡量 $q_e$ 与吸附平衡时溶质浓度 $C_e$ 关系曲线.

2.3.2 动力学试验 称取13份0.1 g改性凹凸棒土,分别置于锥形瓶中,加入25 mL  $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的磷酸盐溶液,置于25℃条件下250  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的恒温振荡器中振荡,每隔一定时间后,过滤,取上清液,测定磷酸盐的浓度.

2.3.3 改性凹凸棒土覆盖抑制底泥磷释放试验 采用5L广口试剂瓶作为底泥磷释放试验的反应器,将3000 g混合均匀的新鲜底泥自瓶口加入,使底泥层厚度保持约为6 cm,然后加入3 L去离子水,并用黑塑料袋罩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物厚度、温度和凹凸棒土粒径对改性凹凸棒土覆盖层抑制底泥磷释放的影响.①空白试验:200 g改性凹凸棒土覆盖与未加覆盖层和300 g过2 mm筛的砂土(取自水库周围)覆盖对比.②温度的影响:考察200 g改性凹凸棒土(粒径200目)覆盖作用下温度(5、15、25℃)对底泥磷释放的影响.③覆盖层厚度:设计3种改性凹凸棒土(粒径200目)投加量,分别为100 g、200 g和300 g.④粒径的影响:凹凸棒土的粒径分别为200目和400目,投加量为200 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反应器上覆水,采用钼锑抗比色法测定总磷浓度.

底泥磷的释放通量采用下式进行计算:

$$R_n = V(c_n - c_0) + \sum_{i=1}^n V_i c_i \quad (1)$$

其中 $R_n$ 为到第 $n$ 天为止底泥磷的释放通量(mg), $V$ 为反应装置中剩余水样的体积(L), $c_n$ 为第 $n$ 次采样时磷的浓度, $c_i$ 为第 $i$ 次采样时磷的浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $c_0$ 为初始磷的浓度( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), $V_i$ 为每次采样量(L).模拟期间底泥磷的平均释放速率计算公式为: $M = R / (T \cdot A)$ ,式中 $R$ 为模拟期间氮磷的释放通量(mg), $T$ 为氮磷释放持续的时间(d), $A$ 为底泥与上覆水接触的表面积( $\text{m}^2$ ), $M$ 为模拟期间氮磷的平均释放速率( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) (林建伟等,2006).释放通量抑制率是指与未加覆盖层试验结果相比,其他覆盖方式的释放通量减少率.

## 3 结果与讨论(Results and discussion)

### 3.1 改性凹凸棒土对磷酸盐的吸附特性

3.1.1 改性凹凸棒土对磷酸盐的吸附等温曲线 图2a为改性凹凸棒土吸附磷酸盐的吸附等温曲线.从图2a可以看出磷在改性凹凸棒土上的吸附量随着平衡液中磷酸盐浓度的增加而逐渐增加,在低浓度时凹凸棒土对磷的吸附量增加较快,即曲线的斜率较大,而高浓度时吸附量增加则较缓慢.

分别采用 Freundlich 公式和 Langmuir 公式对等温吸附数据进行拟合,结果见表2.可以看出, Freundlich 方程式能较好地描述改性凹凸棒土对磷酸盐的等温吸附行为,可决系数 $R^2$ 在0.98以上;而对 Langmuir 吸附等温式的拟合程度并不十分理想.

表2 吸附等温曲线回归分析结果

Freundlich equation			Langmuir equation		
$K_F$	$1/n$	$R^2$	$q_m$	$K$	$R^2$
0.064	1.033	0.985	11.905	0.005	0.821

3.1.2 改性凹凸棒土对磷酸盐的吸附动力学 改性凹凸棒土吸附磷酸盐的吸附动力学见图2b.从图2b可以看出,改性凹凸棒土与磷酸盐的反应速度很快,在30 min内基本达到平衡,浓度由最初的 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到

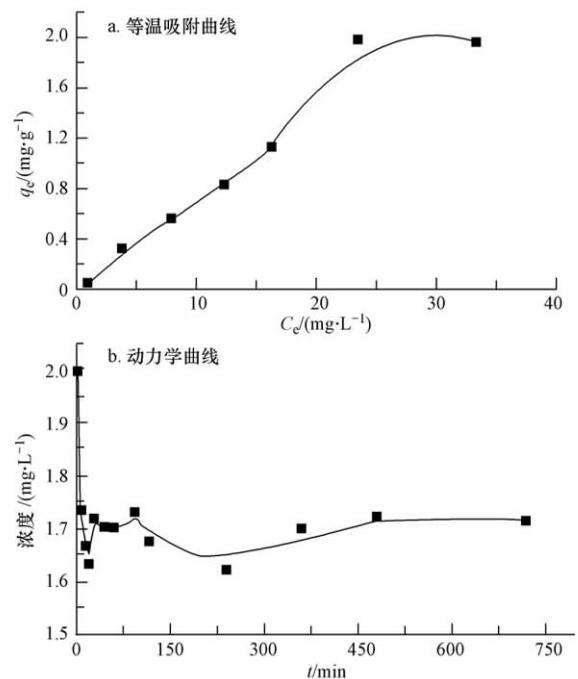


图2 改性凹凸棒土吸附磷酸盐的等温吸附曲线和动力学曲线  
Fig. 2 Adsorption isotherms and kinetic curve of phosphate on modified attapulgite

1.72 mg·L<sup>-1</sup>. 此后磷酸盐的浓度在 1.6 ~ 1.7 mg·L<sup>-1</sup> 之间波动, 并在 6 h 后达到稳定.

### 3.2 改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的影响效果分析

3.2.1 覆盖层类型 考察了改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的效果, 结果如图 3a 所示. 3 条曲线分别为底泥上部未加覆盖层、沙土覆盖和改性凹凸土覆盖条件下底泥总磷的释放情况. 从图 3a 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 Fe(OH)<sub>3</sub> 会变成可溶性 Fe(OH)<sub>2</sub>, 使与铁结合的磷大量地进入水体的缘故(董浩平和姚琪 2004; 王雪蕾等, 2005). 在初始时刻, 上覆水体中的 TP 浓度迅速增加, 释放通量在第 7d 达到了最高值 0.396 mg, 而后逐渐达到平衡, 在小范围内波动. 这是因为在开始阶段, 由于上覆水采用的是去离子水, 其 TP 浓度几乎为零, 底泥释放出的磷通过扩散作用逐渐进入上覆水体从而使 TP 浓度迅速升高. 从图 3a 还可以看出, 与未加覆盖层相比, 沙土覆盖和改性凹凸土覆盖都可以抑制底泥磷的释放, 且凹凸土覆盖优于沙土覆盖. 到第 61d, 沙土覆盖的平均释放速率为 0.062 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 对底泥磷释放通量的抑制率为 46.38%; 凹凸土覆盖的平均释放速率为 0.043 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 对底泥磷释放通量的抑制率为 63.05%. 原因可能是改性凹凸土覆盖层延长了底泥所

释放的磷到达上覆水的时间, 使覆盖层的机械阻挡作用增强, 从而对底泥磷释放的控制效果更好(林建伟等 2007a).

3.2.2 覆盖层厚度 图 3b 为不同厚度凹凸土覆盖作用下底泥总磷的释放规律. 可以看出, 改性凹凸土可以较好地抑制底泥磷的释放, 到模拟释放结束时(第 61d) 100 g 改性凹凸土覆盖对底泥总磷释放通量的抑制率达到 63% 左右. 从图 3b 还可以看出, 厚度对改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的效率影响较大. 覆盖层越厚, 抑制底泥磷释放的效率越高. 改性凹凸土投加量由 100 g 增加到 200 g 再增加到 300 g, 到第 61 d 上覆水的总磷浓度则由 0.042 mg·L<sup>-1</sup> 逐渐下降到 0.019 mg·L<sup>-1</sup> 再下降到 0.014 mg·L<sup>-1</sup>, 对应的覆盖层对底泥总磷释放的抑制率则由 31% 增加到 63% 再增加到 70%. 原因主要是覆盖层越厚, 一方面对应的吸附容量亦越大, 从而控制的时间也越久; 另一方面厌氧状态下底泥所释放出来的总磷穿过改性凹凸土覆盖层到达上覆水的时间越长. 所以覆盖层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.

3.2.3 温度 考察了温度对厌氧条件下改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的影响结果. 从图 4a 可以看出, 不同温度条件下上覆水 TP 浓度有一定的差别: 5℃ 条件下 TP 浓度位于 0.020 ~ 0.052 mg·L<sup>-1</sup>, 15℃ 下位于 0.017 ~ 0.042 mg·L<sup>-1</sup>, 25℃ 条件下位于 0.025 ~ 0.054 mg·L<sup>-1</sup>. 虽然曲线部分有交叉, 但总体趋势显示温度越高, 底泥磷释放的速率越大. 5℃、15℃ 和 25℃ 条件下, 平均释放速率分别为 0.053、0.060、0.086 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>. 主要原因可能是: 温度升高加快了底泥微生物和生物体的活动, 一方面使更多的 Fe<sup>3+</sup> 转换为 Fe<sup>2+</sup>, 从而使与 Fe<sup>3+</sup> 结合的磷酸盐释放量增加; 另一方面, 微生物活动也加速了底泥有机磷向无机磷转换(侯立军等 2003; 韩沙沙和温琰茂 2004). 而改性凹凸土覆盖层控制底泥总磷释放的机理主要是机械阻挡作用, 底泥释放总磷的速率变大, 从而穿过覆盖层进入上覆水的总磷量亦增加.

3.2.4 粒径 图 4b 为不同粒径凹凸土覆盖作用下底泥总磷的释放规律. 到第 61 d 200 目凹凸土覆盖下总磷平均释放速率为 0.086 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 对底泥底泥磷释放通量的抑制率为 23.68%; 400 目凹凸土覆盖下总磷平均释放速率为 0.074 mg·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>, 对底泥底泥磷释放通量的抑制率为 35.28%. 表明粒径对凹凸土覆盖层控制底泥总磷释放存在一定的影响, 即粒

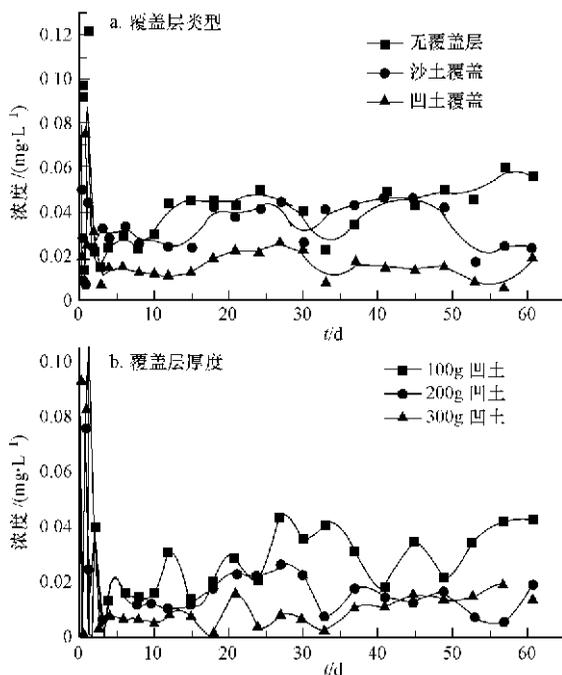


图3 改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的效果

Fig. 3 Effect of modified attapulgite in controlling TP release from sediment

径越小,控制的效果越好.这是因为颗粒越小的改性凹凸土构成的覆盖层越密实,从而对总磷迁移的阻挡作用越强.

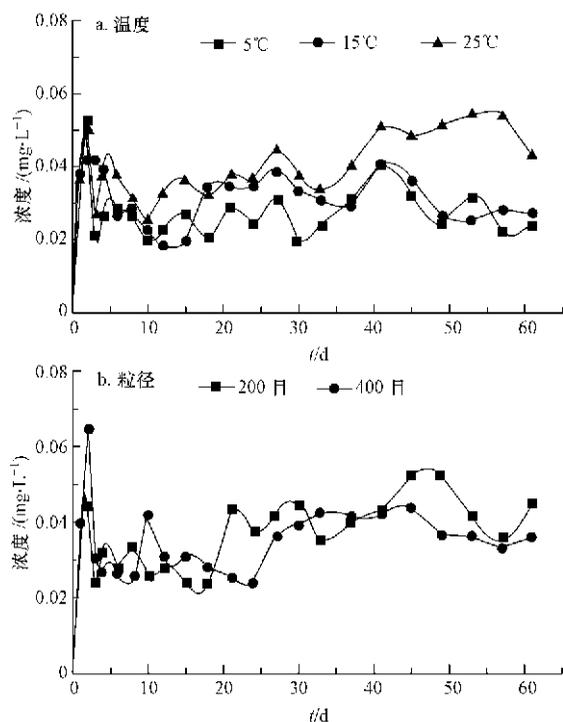


图4 温度和粒径对改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的影响  
Fig. 4 Effect of temperature and grain size on TP release from sediment

#### 4 结论(Conclusions)

1) Freundlich 方程式能较好地描述改性凹凸土对磷酸盐的等温吸附行为,可决系数  $R^2$  在 0.98 以上.改性凹凸土与磷酸盐的反应速度很快,在 30 min 内基本达到平衡,浓度由最初的  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降到  $1.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .此后磷酸盐的浓度在  $1.6 \sim 1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  之间波动,并在 6 h 处达到稳定.

2) 改性凹凸土覆盖层可以抑制厌氧状态下底泥磷的释放,且抑制效果受覆盖层厚度、温度和凹凸土粒径等的影响.

3) 与未加覆盖层相比,沙土覆盖和改性凹凸土覆盖都可以抑制底泥磷的释放,且凹凸土覆盖优于沙土覆盖;厚度对改性凹凸土覆盖抑制底泥总磷释放的效率影响较大,覆盖层越厚,抑制底泥磷释放的效率越高;高温条件与低温条件相比,底泥向上覆水释放更多的磷;粒径对凹凸土覆盖层控制底泥总磷释放存在一定的影响,即粒径越小,控制的效果越好.

责任作者简介:郑西来(1959—),男,教授,博士生导师,中国海洋大学环境科学与工程学院副院长,主要研究方向为地下水污染过程与修复技术、水资源利用与保护、海-陆界面水盐循环.在国内外发表学术论文 100 余篇,其中被 SCI、EI、ISTP 三大检索系统收录 40 余篇(次).出版专著 3 部(第一作者),主编国际会议论文集 1 部.

#### 参考文献(References):

- Azcue J M, Zeman A J, Mudroch A *et al.* 1998. Assessment of sediment and porewater after one year of subaqueous capping of contaminated sediments in Hamilton Harbour, Canada [J]. *Water Science and Technology*, 37(6/7): 323-329
- 包军杰,余贵芬,蒋新,等. 2006. 改性凹凸棒石对模拟含酚废水处理机制的研究[J]. *环境化学*, 25(1): 37-40
- Bao J J, Yu G F, Jiang X, *et al.* 2006. Removal mechanisms of phenol from wastewater by modified attapulgite [J]. *Environmental Chemistry*, 25(1): 37-40 (in Chinese)
- Barry T H, Simon R, Robert J, *et al.* 2003. Active barrier to reduce release from sediments: effectiveness of three forms of  $\text{CaCO}_3$  [J]. *Aust J Chem*, 56: 207-217
- 北京林业大学. 2002. 土壤理化分析实验指导书[M]. 北京: 北京林业大学出版社. 38-49
- Beijing Forestry University. 2002. Direction of Physicochemical Analysis Experiment of Soil [M]. Beijing: Publishing Company of Beijing Forestry University. 38-49 (in Chinese)
- Cases J M, Grillet Y, Francois, *et al.* 1991. Evolution of the porous structure and surface area of palygorskite under vacuum thermal treatment [J]. *Clays and Clay Minerals*, 39(2): 191-201
- 陈天虎. 2000. 改性凹凸棒石粘土吸附性能对比实验研究[J]. *工业水处理*, 20(4): 27-29
- Chen T H. 2000. Experimental study by contrast on the adsorbing capability of modified palygorskite clay [J]. *Industrial Water Treatment*, 20(4): 27-29 (in Chinese)
- Church T M, Velde B. 1979. Geochemistry and origin of a deep-sea Pacific palygorskite deposit [J]. *Chem Geol*, 26: 312-339
- 董浩平,姚琪. 2004. 水体沉积物磷释放及控制[J]. *水资源保护*, 20(6): 20-23
- Dong H P, Yao Q. 2004. Study on the contributions of microorganisms in nitrogen cycle of wetland [J]. *Water Resources Protection*, 20(6): 20-23 (in Chinese)
- 董庆洁,邵仕香,李乃璋. 2006. 凹凸棒土复合吸附剂对磷酸根吸附行为的研究[J]. *硅酸盐通报*, (2): 19-22
- Dong Q J, Shao S X, Li N X. 2006. Study on the treatment of water containing phosphates with attapulgite compound adsorbents [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, (2): 19-22 (in Chinese)
- 高增文. 2008. 山区水库氮污染行为与控制技术研究——以田庄水库为例[D]. 青岛: 中国海洋大学. 10-12
- Gao Z W. 2008. Behaviors and controls of nitrogen pollution in a mountainous reservoir: a case study of the Tianzhuang reservoir [D]. Qingdao: Ocean University of China. 10-12 (in Chinese)
- 韩沙沙,温琰茂. 2004. 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, 23(2): 98-101
- Han S S, Wen Y M. 2004. Phosphorus release and affecting factors in the sediments of eutrophic water[J]. Chinese Journal of Ecology, 23(2): 98-101( in Chinese)
- 侯立军, 刘敏, 许世远. 2003. 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, 22(4): 258-260
- Hou L J, Liu M, Xu S Y. 2003. Effect of environmental factors on phosphorus release from sediments in urban reaches of Suzhou creek [J]. Shanghai Environmental Science, 22(4): 258-260 ( in Chinese)
- Jacobs P H, Forstner U. 1999. Concept of subaqueous capping of contaminated sediments with active barrier systems( ABS) using natural and modified zeolites [J]. Water Research, 33(9): 2083-2087
- 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 2006. 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, 27(5): 880-884
- Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, et al. 2006. Influencing factors of phosphorus release control from sediments by compound barrier constructed with zeolite and calcite [J]. Environment Science, 27(5): 880-884( in Chinese)
- 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 2007a. HCl 改性沸石和方解石复合覆盖层控制底泥氮磷释放的效果及机理研究[J]. 环境科学, 28(3): 551-555
- Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, et al. 2007a. Efficiency and mechanism of compound barrier with HCl modification zeolite and calcite to control nitrogen and phosphorus release from sediments [J]. Environment Science, 28(3): 551-555( in Chinese)
- 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 2007b. 有机改性沸石覆盖抑制底泥氮磷释放的效果[J]. 同济大学学报, 35(12): 1651-1655
- Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, et al. 2007b. Efficiency of barrier with modified zeolite to control nitrogen and phosphorus release from sediments [J]. Journal of Tongji University( Natural Science), 35(12): 1651-1655( in Chinese)
- 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 2008a. 方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放的影响因素研究[J]. 环境科学, 29(1): 121-126
- Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, et al. 2008a. Influencing factors of calcite active barrier system to control phosphorus release from sediments [J]. Environment Science, 29(1): 121-126( in Chinese)
- 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 2008b. 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[J]. 环境科学, 29(2): 356-361
- Lin J W, Zhu Z L, Zhao J F, et al. 2008b. Efficiency and mechanics of surfactant modified zeolite with nitrate adsorbed to control nitrogen and phosphorus release from sediments [J]. Environment Science, 29(2): 356-361( in Chinese)
- 王雪蕾, 王金生, 王宁, 等. 2005. 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, 6(9): 47-50
- Wang X L, Wang J S, Wang N, et al. 2005. Experimental study on phosphate release from sediments of Erlong Lake [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 6(9): 47-50 ( in Chinese)
- 王雅萍, 刘云, 董元华, 等. 2008. 凹凸棒石粘土对氨氮废水吸附性能的研究[J]. 农业环境科学学报, 27(4): 1525-1529
- Wang Y P, Liu Y, Dong Y H, et al. 2008. Adsorption of palygorskite on ammonia nitrogen in waste water [J]. Journal of Agro-Environment Science, 27(4): 1525-1529( in Chinese)
- 叶恒朋, 陈繁忠, 盛彦清, 等. 2006. 覆盖法控制城市河涌底泥磷释放研究[J]. 环境科学学报, 26(2): 262-267
- Ye H P, Chen F Z, Sheng Y Q, et al. 2006. Suppressing phosphate liberation from urban river sediment using capping method [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 26(2): 262-268( in Chinese)
- 张俊. 2006. 凹凸棒土理化性质分析及其在废水处理中的应用[D]. 贵州: 贵州大学. 24-52
- Zhang J. 2006. The Analysis of Physicochemical Property of Attapulgite and Its Application in Effluent Disposal [D]. Guizhou: Guizhou University. 24-52( in Chinese)