

# 改性沸石的磷钝化影响因素研究

杨永琼<sup>1,2</sup>, 陈敬安<sup>1,\*</sup>, 曾艳<sup>1</sup>, 王敬富<sup>1,2</sup>, 杨海全<sup>1,2</sup>, 计永雪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 通过实验室模拟, 对比研究了在不同环境条件下(温度、pH 值、溶解氧和上覆水磷浓度)改性沸石的沉积物磷钝化效率。结果表明: 改性沸石能有效减少不同环境条件下沉积物磷的释放量, 具有较好的钝化效果, 同时可吸附减少水体重金属离子含量, 对水环境基本上没有负面影响。改性沸石对沉积物磷的钝化效率主要受水体 pH 值控制, 上覆水体溶解氧含量、水体温度和上覆水磷含量对钝化效果影响较小。

**关键词:** 改性沸石; 沉积物; 磷; 钝化; 影响因素

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2013)06-0625-06

水体富营养化是目前最主要的水环境问题之一, 我国有 80% 以上的湖泊和水库处于水体富营养化状态, 如滇池、太湖和巢湖等大型湖泊均为重度富营养化湖泊<sup>[1-3]</sup>。湖泊沉积物不仅是污染物的汇, 同时也是污染物的源<sup>[4,5]</sup>。尤其是外源污染物不断进入湖泊沉积物, 并积累到一定程度之后, 沉积物内源污染物的释放就可能超过外源输入而成为水体污染物的主要来源, 并造成水体持续富营养化。磷是控制水体富营养化的关键因素, 有效减少沉积物内源磷释放是当前水体富营养化治理的关键<sup>[6]</sup>。

红枫湖是位于贵州高原中部喀斯特地区的亚深水人工水库。自上世纪 90 年代以来, 湖泊水质不断恶化<sup>[7]</sup>, 水体富营养化程度日益加重, 蓝藻暴发时有发生, 直接威胁区域供水和生态安全。红枫湖为典型的磷限制型富营养化水库, 其总氮(TN)/总磷(TP)达 40:1 以上<sup>[8,9]</sup>, 沉积物中活性较高的有机磷和铁、锰氧化物结合态磷含量高<sup>[10,11]</sup>。因此, 要想彻底改善红枫湖水环境质量, 在控制湖泊外源污染物输入的同时, 还必须进行湖泊底泥污染治理。由于红枫湖水体深度较大, 生物技术和环保疏浚难以达到沉积物修复的目的, 采用钝化技术可以有效减少沉积物内源磷的释放。

改性沸石作为沉积物磷钝化剂, 可有效减少沉积物内源磷释放<sup>[12,13]</sup>。研究不同环境条件下改性沸石的磷钝化效果不仅有助于明确其适用范围, 而且有助于深入揭示其钝化机理, 并为进一步优化钝化剂组成、提高钝化效果提供科学指导。本研究以红枫湖污染较严重的代表性沉积物为研究对象, 通过系列模拟实验, 探讨了改性沸石沉积物磷钝化的影响因素, 为改性沸石的广泛应用提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

2012 年 8 月, 采用抓斗式采样器采集红枫湖污染较重的大坝湖区表层 5 cm 沉积物作为实验样品。样品采集后装于样品箱内, 带回实验室 0~4℃ 保存, 部分样品冷冻干燥后研磨过 100 目筛备用。实验用水为沉积物采集区的湖水(pH=8~9), 采集后用 0.45 μm 混合滤膜过滤, 实验室 0~4℃ 保存。实验所用钝化剂为铝改性沸石, 改性比例为 2:1(沸石:改性物)<sup>[14]</sup>。实验所用沸石源自河南信阳, 改性物为硫酸铝, 主要成分为  $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ 。

### 1.2 实验方法

实验以 1000 mL 烧杯为实验容器, 称取 200 g 混合均匀的新鲜沉积物, 平铺于烧杯底部, 沉积物

收稿日期: 2013-03-20; 改回日期: 2013-05-26

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAC02B0201); 贵阳市科技计划项目(筑科合同[2011]103), [2010]筑科农合同字第 5-2 号)。

第一作者简介: 杨永琼(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事水体污染治理研究。E-mail: yyongqiong@163.com.

\* 通讯作者: 陈敬安, 男, 研究员, 主要从事环境地球化学研究。E-mail: chenjingan@vip.skleg.cn.

厚度约 2 cm, 沉积物稳定一天后, 虹吸法加入原位过滤湖水 700 mL。实验控制环境条件包括温度、pH 值、溶解氧 (DO) 及上覆水磷浓度, 各影响因素下的具体实验条件如表 1 所示。相同实验条件下设置实验组和空白对照组, 稳定 1 天后, 实验组加入 0.75 g 改性沸石。实验期间定期取上覆水体, 测定水体中溶解活性磷 (DRP) 含量, 分析改性沸石的沉积物磷抑制效率, 探讨钝化效果的影响因素。同时, 保存一组实验上覆水测定其有害重金属元素含量, 探讨钝化过程钝化对水体生态环境的负面影响。为保持上覆水体积不变, 在取样的同时加入相同体积的过滤湖水。

### 1.3 实验条件的控制

**温度:** 利用人工气候培养箱, 分别调节温度至 5℃、15℃、25℃, 温度偏差小于 0.5℃。

**pH 值:** 分别用 1 mol/L 的盐酸和 1 mol/L 氢氧化钠溶液为调节液, 使水体初始 pH 值分别至 5.5、7.5 和 9.5。

**DO:** 分别向好氧组和厌氧组上覆水体通入氧气和氮气, 氧气和氮气每隔 1 h 通气 2 h, 使上覆水体溶解氧含量大于 6 mg/L (好氧) 和小于 2 mg/L (厌氧)。

**上覆水磷含量:** 以磷酸二氢钾溶液改为“为调节液”, 调节水体磷含量分别至 0.0 mg/L (未添加)、0.1 mg/L、0.3 mg/L、0.5 mg/L, 实验模拟上覆水磷含量变化对改性沸石磷钝化效果影响。

表 1 钝化实验条件

Table 1 The conditions of *in-situ* inactivation experiment

实验分组	T (°C)	pH	DO (mg/L)	磷含量 (mg/L)
1	5	7.5~8.0	<2	~0.0
2	15	7.5~8.0	<2	~0.0
3	25	7.5~8.0	<2	~0.0
4	25	5.5	<2	~0.0
5	25	7.5	<2	~0.0
6	25	9.5	<2	~0.0
7	25	7.5~8.0	>6	~0.0
8	25	7.5~8.0	<2	0.1
9	25	7.5~8.0	<2	0.3
10	25	7.5~8.0	<2	0.5

~0.0 mg/L, 即上覆水体为未添加磷溶液的过滤湖水。

### 1.4 分析测试和数据处理

水体 DRP 含量采用钼酸盐分光光度法 (700

nm) 测定。水体微量元素 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 利用高分辨等离子体质谱仪 (ICP-MS) 进行测定, 常量元素 Fe、Mn 含量利用电感耦合等离子体-光发射光谱 (ICP-OES) 测定。其中微量元素测量误差小于 5%, 常量元素测量误差小于 5%。利用 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析测定沉积物主量元素, 沉积物粒度通过 Malvern 2000 粒度分析仪测定。

沉积物磷钝化效率  $W = (C_{0i} - C_i) / C_{0i} \times 100\%$ , 其中  $C_i$  为实验组第  $i$  次取样时水体磷浓度,  $C_{0i}$  为空白控制组第  $i$  次取样时上覆水体磷浓度。当  $W > 0$  时, 实验组上覆水体磷含量小于空白控制组磷含量, 沉积物释放量减少; 当  $W < 0$  时, 实验组上覆水体磷浓度大于空白控制组磷含量, 沉积物里磷释放量增加。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 沉积物物理化学性质

实验所用沉积物采集于红枫湖的大坝湖区, 该沉积物颜色较深, 有刺激性气味。沉积物的主要成分为硅、铝、铁氧化物, 所占比例分别为 50.7%、15.3% 和 7.5%, 与沉积物磷形态相关锰 (Mn) 含量也较高, 为 1025.5 mg/kg。该研究区沉积物粒度较细, 其中 90% 以上粒径小于 65  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 温度对沉积物磷钝化效率的影响

水体温度变化可能导致水体磷形态及含量的变化, 改性沸石形成的  $\text{Al}(\text{OH})_3$  主要吸附水体无机磷, 对有机磷的吸附去除效果不明显<sup>[15]</sup>, 因此温度的变化可能影响钝化剂的磷钝化效率。不同温度条件下, 改性沸石的沉积物磷钝化效率变化如图 1 所示。从图中可以看出, 不同温度条件下, 改性沸石均能较好的抑制沉积物磷释放, 钝化效率表现为先增加后降低再升高的趋势。5℃、15℃、25℃ 下的平均磷钝化效率分别为 67%、57% 和 71%, 就平均钝化效率, 25℃ 和 5℃ 下的磷钝化效率较好, 而在 15℃ 时, 磷钝化效率相对较差, 且存在较大的波动。

温度是影响沉积物磷释放量的主要因素, 温度升高沉积物磷释放量也逐渐增加<sup>[16,17]</sup>, 且 DRP 增加比例大于 TP<sup>[18]</sup>。另外, 温度升高会增加微生物的活性及数量, 消耗水体中溶解氧, 导致沉积物中易受氧化还原影响的铁/锰结合态、有机态等活性态磷释放到水体, 增加水体中 DRP 比例。水体 DRP 比例的增加, 有利于  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的吸附, 进而增加沉积物磷的钝化效率, 因此, 在高温条件下, 钝化

剂的磷钝化效率较高。同时,生物数量及活性的增加会引起沉积物再悬浮,破坏钝化层的稳定性<sup>[19]</sup>,并消耗水体中 DRP,这是钝化前期钝化效率不稳定的主要原因。在温度较低的情况下,微生物活动较弱,水体中磷释放总量小,水体各形态磷比例相对稳定<sup>[20]</sup>,所以,5℃时钝化剂的沉积物磷钝化效率也相对较高。

总体上,改性沸石可以在不同温度下达到较好沉积物磷的钝化效果。该实验还表明,沉积物磷的钝化实施最佳时期应为温度较高的夏季时期。

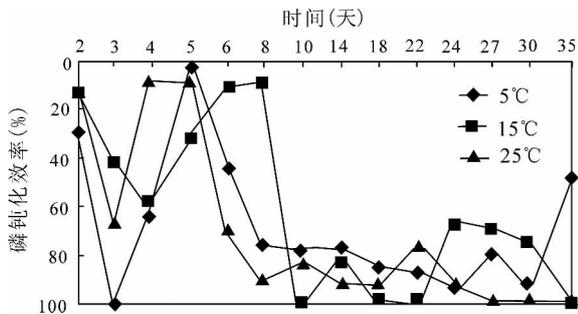


图 1 不同温度下改性沸石的磷钝化效果

Fig. 1 The inactive efficiency of modified zeolite at different temperatures

### 2.3 上覆水体 pH 值对钝化效果的影响

不同 pH 值下,改性沸石的沉积物磷钝化效率变化如图 2。由图 2 可以看出,改性沸石可以有效抑制不同 pH 值下沉积物磷的释放,磷钝化效率随时间逐渐增加。不同 pH 值下,沉积物磷的钝化效率有一定差异,碱性环境下(pH=9.5)的磷钝化效率最高,平均效率可达 81%,其次为中性环境下(pH=7.5),平均钝化效率为 71%,而酸性环境下(pH=5.5)的钝化效率最低,平均钝化效率为 53%。

水体 pH 值的变化,一方面会改变沉积物的理化性质<sup>[20]</sup>;另一方面,影响钝化剂的稳定性<sup>[21]</sup>。实验所用改性沸石的主要成分为沸石和硫酸铝,水体 pH 值变化通过影响 Al(OH)<sub>3</sub> 絮凝体的稳定性来影响磷的钝化效果。在中性环境下,Al(OH)<sub>3</sub> 具有最佳的磷吸附效果,且沉积物磷释放量最小<sup>[22,23]</sup>,因此在中性条件改性沸石可以保持稳定、高效的沉积物磷钝化效率。酸性条件下,沉积物、水体中的有机磷、钙结合态磷逐渐分解并释放到水体,增加水体磷含量。加之铝离子水解,进一步降低水体 pH 值。在 pH < 6 时,Al(OH)<sub>3</sub> 溶解形成 Al(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup>、Al<sup>3+</sup>,因此,酸性条件下沉积物磷的钝

化效率较低。碱性条件下,可能会促使沉积物中氧化物结合态磷释放,然而,在石灰岩分布较广的地区,地表水体硬度大,提高上覆水的 pH 值,可使沉积物对磷的吸附能力增加,降低磷的释放量<sup>[24]</sup>。红枫湖位于喀斯特地区,水体硬度大且水体偏碱性,因此其在高 pH 值下,沉积物磷释放量减小。另一方面,受铝离子水解作用影响,降低了水体 pH 值,使水体 pH 值处于中性环境下。因此,碱性条件下改性沸石的沉积物磷钝化效率相对增加。

水体 pH 值的变化对改性沸石的沉积物磷钝化效率影响较大,其差异近 30%,说明在对湖泊实施钝化的过程中应充分考虑水体 pH 值的影响,结合水体实际水环境条件,优化钝化剂组合。

在酸性条件下,Al<sup>3+</sup>的水解使水体 pH 值进一步降低,导致改性沸石的磷钝化效果相对较差。为有效提高酸性条件下沉积物磷钝化效率,可以在钝化剂的实施过程中加入适当缓冲剂或增加粘土用量,减缓水体酸化<sup>[14]</sup>,提高 Al(OH)<sub>3</sub> 钝化层的稳定性。而在碱性、硬度较大的水体中,湖水本身有较大的缓冲能力,可以有效减缓甚至避免钝化过程中水体的酸化,从而有效减少沉积物磷的释放。但若在添加钝化剂之后,水体 pH 仍较高,此时可以在改性钝化剂中适当增加硫酸铝用量,以确保 Al(OH)<sub>3</sub> 的稳定性。水体的 pH 值越大,胶体的 zeta 点位越偏负<sup>[25]</sup>,因此,可在碱性水体的钝化过程中可以适当加入带正电荷的离子,增加 Al(OH)<sub>3</sub> 絮凝层的稳定性。

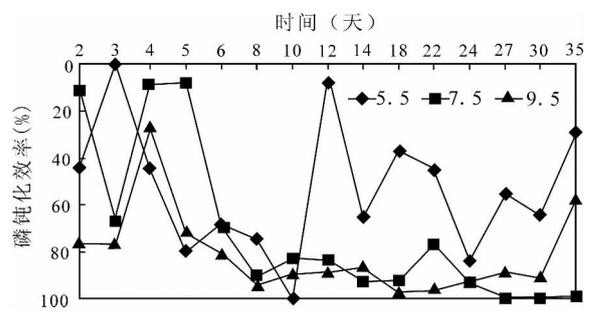


图 2 不同 pH 值下钝化剂的磷钝化效果

Fig. 2 The inactive efficiency of modified zeolite under different pH values

### 2.4 溶解氧对钝化效果的影响

图 3 为改性沸石在厌氧及好氧环境下沉积物磷的钝化效率随时间变化图。由图 3 可见,改性沸石在厌氧和好氧环境下的沉积物磷钝化效率无明显差别,两者的平均磷钝化效率均在 70% 以上(好氧

74%，厌氧 72%）。好氧环境下，改性沸石的钝化效率略高于厌氧环境下的钝化效率，主要原因是沉积物在厌氧环境下的磷释放量较大。

水体溶解氧含量是影响沉积物水界面物质迁移的重要因素<sup>[26,27]</sup>。深水、亚深水型湖泊存在温跃层，其下层滞水层一般处于厌氧状态，上下水体混合的过程中加速沉积物中易受氧化还原状态影响的铁/锰结合态磷及弱结合态磷释放到上覆水体<sup>[28]</sup>，增加水体磷含量。

本次实验所用改性沸石，有效减少了厌氧环境下沉积物磷的释放，可以广泛用于该类型湖泊内源磷的治理，解决深水、亚深水型湖泊沉积物污染治理的难题。

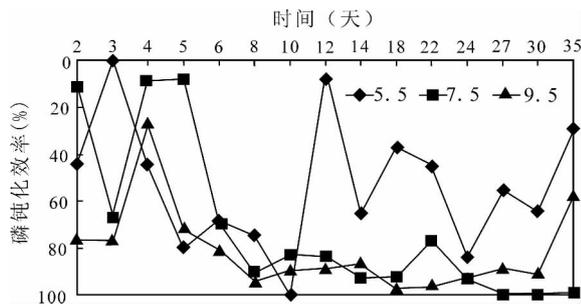


图3 不同含氧条件下钝化剂的磷钝化效果

Fig. 3 The inactive efficiency of modified zeolite under different dissolved oxygen levels

### 2.5 上覆水磷含量对钝化效果的影响

磷是湖泊初级生产的限制性营养元素<sup>[29]</sup>，上覆水磷浓度是评价水体富营养化程度的主要指标。在不同磷含量上覆水下，改性沸石的沉积物磷钝化效率是衡量钝化剂适用范围的最佳指标。实验过程中，不同磷含量上覆水的沉积物磷钝化效率如图4。从图中可以看出，与未加磷溶液实验组相比，增加

上覆水磷浓度，改性沸石的沉积物磷钝化效率明显增加，增加比例最高可达30%，说明该改性沸石可以用于高浓度磷含量下的沉积物磷钝化。

上覆水磷含量增加使钝化效率相对增加的原因包括以下几方面：第一，水体中添加的磷主要是溶解无机磷(DIP)，其更有利于钝化剂的吸附；第二，人工增加上覆水磷含量会破坏沉积物-水界面物质平衡，上覆水体磷通过扩散等作用向沉积物界面移动，沉积物从“源”转为“汇”，沉积物磷的释放量也相应减小，因此改性沸石的钝化效率增加。

通过实验也可说明，该改性沸石有足够的磷吸附效率，其可用于高磷浓度水体的磷钝化。

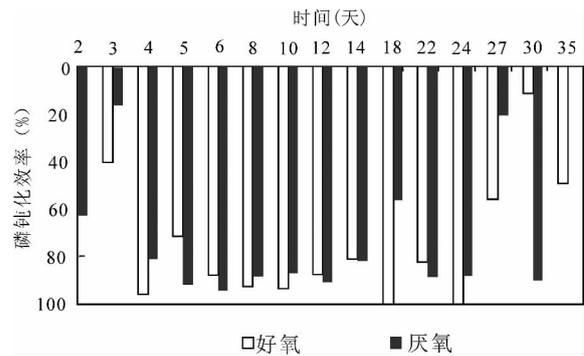


图4 不同上覆水磷含量对沉积物磷钝化效果影响

Fig. 4 The effect of different P concentrations on the P inactive efficiency

### 2.6 钝化剂对水环境影响

钝化实验过程中，上覆水体有害重金属元素含量随时间变化如表2所示。以《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅰ类水质为标准可以看出，钝化过程中上覆水体Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb等有害元素含量均远低于地表水Ⅰ类中限值，说明该钝化剂的使用不会造成水质污染。与空白对照组相比，钝

表2 水体重金属含量变化

Table 2 Variations in heavy metal contents of overlying water

元素	Ⅰ类水水质标准	空白对照	实验取样时间(天)				
			3	5	11	14	20
Cr(μg/L)	10.00	6.82	4.59	4.84	2.43	3.40	3.29
Cu(μg/L)	10.00	0.25	~	~	~	~	~
Zn(μg/L)	50.00	1.48	1.45	4.84	2.41	1.28	2.07
As(μg/L)	50.00	1.15	0.23	0.23	0.23	0.18	0.19
Cd(μg/L)	1.00	0.13	0.16	0.16	0.09	0.09	0.10
Pb(μg/L)	10.00	5.32	3.26	3.40	1.56	2.38	2.41
Fe(mg/L)	0.30	0.16	0.32	0.43	0.28	0.37	0.34
Mn(mg/L)	0.10	0.10	0.25	0.40	0.61	0.45	0.22
Al(mg/L)	0.20	0.09	0.42	0.78	0.35	0.80	0.31

~ 低于仪器检测限。

化过程中减少了水体 Cr、Cu、As、Pb 等离子的含量,钝化后期可减少 Cd 离子浓度,说明改性沸石可以吸附重金属离子,减少水体重金属浓度。

常量元素 Al、Fe、Mn 含量较 I 类水标准和空白对照组高,其主要有两个原因:①原湖水水体本身含量较高;②钝化剂和沉积物本身的释放。铁/锰结合态磷是沉积物磷的主要形态<sup>[10,11]</sup>,在钝化过程中,铁锰结合态磷逐渐向铝结合态、钙结合态磷转变,导致部分铁、锰溶解到水体,增加了水体铁、锰的含量。

虽实验上覆水中 Al、Fe、Mn 含量相对较高,但根据本次实验钝化剂添加量(80 g/m<sup>2</sup>),上覆水量 700 mL 计算,其总量小于 5 mg。若野外试验中按照水体深度 7 m 计算,每平方米的水量为 7×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>,小于 5 mg 的 Fe、Mn 溶解在水体中的浓度小于 0.0007 mg/L,如此微量的 Fe、Mn 对水环境影响几乎可以忽略不计。所以,从上述角度分析来看,以

改性沸石作为沉积物磷钝化剂不会对水体生态环境造成二次污染,可以广泛应用于沉积物磷的修复。

### 3 结论

水体温度、上覆水体 DO 含量和磷含量的变化对改性沸石的磷钝化效果影响较小。水体 pH 值是影响磷钝化效果的主要因素,其通过改变沉积物的物理化学性质和钝化剂的稳定性来影响钝化剂的磷钝化效果。酸性条件下的磷钝化效率最低,碱性环境下的磷钝化效率最高。水体 pH 值是水体主要的化学性质之一,因此在钝化剂应用过程中,应结合湖泊具体条件进行优化改性,建立一湖一策的钝化剂和钝化工艺。

改性沸石在不同环境条件下能有效减少沉积物磷释放,具有较好的钝化效果,并吸附部分重金属离子含量,对水环境基本上没有负面影响,可在湖泊沉积物磷修复中广泛应用。

### 参 考 文 献

- [1] 范成新,张路.太湖一沉积物污染与修复原理[M].科学出版社,2009.
- [2] 秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,2002,14(3):193-202.
- [3] 李宝,丁士明,范成新,等.滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J].环境科学,2008,29(1):114-120.
- [4] Kowalczevska-Madura K, Goldyn R, Dondajewska R. The bottom sediments of Lake Uzarzewskie-phosphorus source or sink [J]? Oceanological and Hydrobiological Studies, 2010, 39(3):81-91.
- [5] Özkundakci D, Hamilton D P, Gibbs M M. Hypolimnetic phosphorus and nitrogen dynamics in a small, eutrophic lake with a seasonally anoxic hypolimnion [J]. Hydrobiologia, 2011, 661(1):5-20.
- [6] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, 34(7):2037-2042.
- [7] 万国江. 云贵高原深水湖库环境过程及水源保护途径[J]. 中国工程科学, 2009, 11(5):61-71.
- [8] 陈敬安,张润宇,李键,等.红枫湖底泥污染物空间分布特征[C].红枫湖-百花湖-阿哈水库水资源环境保护研讨会论文集,2009:102-112.
- [9] 万国江,万恩源,陈敬安,等.深水人工湖环境生物地球化学过程研究:以贵州红枫湖-百花湖为例[J].地球与环境,2010,38(3):262-270.
- [10] 王雨春,马梅,万国江,等.贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史[J].湖泊科学,2004,16(1):21-27.
- [11] 王敬富,陈敬安,曾艳,等.贵州红枫湖沉积物磷赋存形态的空间变化特征[J].湖泊科学,2012,24(5):789-796.
- [12] Gibbs M, Özkundakci D. Effects of a modified zeolite on P and N processes and fluxes across the lake sediment-water interface using core incubations [J]. Hydrobiologia, 2011, 661(1):21-35.
- [13] Gibbs M M, Hickey C W, Özkundakci D. Sustainability assessment and comparison of efficacy of four P-inactivation agents for managing internal phosphorus loads in lakes; Sediment incubations [J]. Hydrobiologia, 2011, 658(1):253-275.
- [14] 杨永琼,陈敬安,王敬富,等.改性沸石的沉积物磷钝化效果研究[J].地球与环境,2013,41(3):288-295.
- [15] 胡晓娟,金相灿,梁丽丽,等.不同改良条件下硫酸铝对滇池污染底泥磷的钝化效果[J].环境科学学报,2008,28(1):44-49.
- [16] Jiang X, Jin X C, Yao Y, et al. Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. Water research, 2008, 42(8-9):2251-2259.
- [17] 丁建华,王翠红,周新春,等.环境因子对晋阳湖沉积物磷释放的影响[J].山西大学学报:自然科学版,2008,31

- (4):626—629.
- [18] 郑苗壮, 卢少勇. 温度对钝化剂抑制滇池底泥磷释放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(9):2465—2469.
- [19] Egemose S, Wauer G, Kleeberg A. Resuspension behaviour of aluminium treated lake sediments: Effects of ageing and pH [J]. Hydrobiologia, 2009, 636(1): 203—217.
- [20] 耿金菊, 王强, 牛晓君, 等. 环境因子对湖泊沉积物中吸附态磷化氢生成和释放的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5):681—685.
- [21] Cooke G D, Welch E B, Peterson S A, *et al.* Restoration and management of lakes and reservoirs (second edition)[M]. Lewis Pub. (CRC Press, Inc.), 1993, Boca Raton, FL.
- [22] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 模拟水体 pH 控制条件下太湖梅梁湾沉积物中磷的释放特征[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5):663—668.
- [23] Peng J F, Wang B Z, Song Y H, *et al.* Adsorption and release of phosphorus in the surface sediment of a wastewater stabilization pond [J]. Ecological Engineering, 2007, 31(2):92—97.
- [24] 杨文澜, 刘力. 地表水体底泥中氮磷及重金属的释放规律研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17):8151—8152.
- [25] 王慧云, 崔亚男, 张春燕. 影响胶体粒子 zeta 电位的因素[J]. 实验研究, 2010, 7(20):28—30.
- [26] 张路, 范成新, 王建军, 等. 长江中下游湖泊沉积物氮磷形态与释放风险关系[J]. 湖泊科学, 2008, 20(3):263—270.
- [27] 龚春生, 范成新. 不同溶解氧水平下湖泊底泥-水界面磷交换影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(003):430—436.
- [28] 王敬富, 陈敬安, 杨永琼, 等. 红枫湖季节性热分层消亡期水体的理化特征[J]. 环境科学研究, 2012, 25(8):845—851.
- [29] Eggleton J, Thomas K V. A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events [J]. Environment International, 2004, 30(7):973—980.

## The Factors Influencing P Inactivation Efficiency of Modified Zeolite

YANG Yong-qiong<sup>1,2</sup>, CHEN Jing-an<sup>1,\*</sup>, ZENG Yan<sup>1</sup>, WANG Jing-fu<sup>1,2</sup>,  
YANG Hai-quan<sup>1,2</sup>, JI Yong-xue<sup>1,2</sup>

(1. The State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The P inactive efficiencies of modified zeolite under various influencing factors including temperature, pH, DO and P concentrations, were studied in this paper. The results showed that modified zeolite can effectively reduce phosphorus release from sediments under different conditions, and does not release poisonous elements into the water. The DO of the overlying water has low or no impact on P inactive efficiency. However, pH is a major factor, but temperature and P concentrations have less impact.

**Key words:** modified zeolite; sediment; phosphorus inactive; influencing factor