

工业膨胀蛭石对水体中磷的去除研究

金诗迪¹, 秦文莉¹, 夏枚生¹, 叶 瑛¹, 韩兵男²

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 杭州 310058; 2. 上海交通大学医学院附属仁济医院, 上海 200127)

摘要:研究了工业膨胀蛭石对模拟养殖废水中磷酸盐的吸附性能,考察了 pH 值、吸附时间、固液比对吸附效果的影响,并通过原子吸收光谱法测定了蛭石在对磷酸盐吸附过程中主要金属元素的浸出含量,探究膨胀蛭石吸附水中磷的吸附平衡,对吸附机理进行了探讨。结果表明,工业膨胀蛭石对磷酸盐的吸附量可达 2.76 mg/g, pH 值在 3~9 的范围内有较高的吸附量, K、Ca、Mg 这 3 种元素的浸出含量随着溶液中磷酸盐浓度升高而增加, Fe、Al 元素则相应减少;工业膨胀蛭石对磷的吸附机理主要是先通过离子交换作用交换出层间阳离子,然后与 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 反应形成沉淀被吸附,吸附等温曲线均符合 Freundlich 公式与 Langmuir 公式,相关系数分别为 0.978 1 和 0.985 1。

关键词:工业膨胀蛭石 磷酸盐吸附 pH 值 金属元素

中图分类号: X524; P578.963

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)02-0377-08

A study of phosphorus adsorption of industrial expanded vermiculite

JIN Shi-di¹, QIN Wen-li¹, XIA Mei-sheng¹, YE Ying¹ and HAN Bing-nan²

(1. Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Renji Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200127, China)

Abstract: Excess water phosphorus will cause phytoplankton blooms and result in eutrophication, so the decontamination of phosphorus becomes an urgent task in China. In this paper, adsorption of phosphorus was investigated by using industry expanded vermiculite collected in Henan Province. In this paper, phosphorus adsorption isotherm was examined, and the effects of pH value, adsorption time and dosage of vermiculite were investigated. During the agitated batch experiments, the leaching behavior of metals in vermiculite was studied and the reaction mechanism was revealed. The results show that precipitation reaction and ion exchange with iron and aluminum elements in vermiculite are the dominating mechanisms of phosphorus removal. With correlation coefficient of 0.985 1 and saturation adsorption capacity of 2.76 mg/g, Langmuir isotherm fitted the data of phosphorus adsorption on vermiculite very well. Finally, significant influence of pH value on phosphorus sorption was observed within the pH range of 3~9 in the tested sample system.

Key words: industrial expanded vermiculite; phosphorus adsorption; pH value; metal elements

随着我国近海和内陆渔业自然资源的衰竭,水产养殖在渔业发展中的作用将更加突出。但是,水产养殖业向外排出的污染物也快速增加,成为水体富营养化的污染源(Rabalais *et al.*, 2009; Xu Hai *et*

al., 2010)。目前的海水养殖,都是把养殖废水不经处理直接排入海域,特别是在海水养殖密集区,为了增加水产品的产量,人们向养殖水体中投放大量的人工饲料,这些饲料中含有大量能使水体富营养

收稿日期: 2013-08-30; 修订日期: 2013-10-28

基金项目: 浙江大学海洋学科交叉研究引导基金(2012HY001B); 浙江省舟山市科技局一般合作类项目(2012C33023); 杭州湾海域、海岸带生态修复示范工程(2011918)

作者简介: 金诗迪(1988-), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事环境矿物材料研究, E-mail: jsd656@126.com; 通讯作者: 韩兵男, 副教授, 硕导, E-mail: bingnanh@hotmail.com。

化的 N、P 元素。研究发现 (Funge-Smith and Matthew, 1998), 精养虾池中饲料的物质平衡在养殖过程中只有 10% 的 N 和 7% 的 P 被利用, 其他都以各种形式进入环境。在养殖过程中, 这些未被利用的饲料、水生产物的排泄物以及其他氮、磷营养盐等排入到海水中, 容易引发海水富营养化和赤潮。当海域发生赤潮时, 海水中浮游植物的异常爆发会释放内毒素和外毒素, 使海水 pH 值升高, 导致海域内生态系统失去平衡, 大量水生生物死亡, 回流的海水带来的毒素也会严重影响养殖场的正常运行。磷是引起水体富营养化的关键营养物质。一般来说, 水体中磷含量超过 20 mg/m^3 就被认为水体处于富营养化。因此, 寻找科学环保治理方法无论对于水产养殖场排放污染物还是对于水体循环利用, 均具有非常重要的现实意义。基于对天然矿物的表面活性、超细效应、化学成分、晶体结构、物理性质及其改性技术等方面的研究, 发现了矿物具有良好的环境属性, 鲁安怀 (鲁安怀, 1999, 2001) 提出矿物法是继物理法、化学法、生物法之后的第四类污染治理方法。

蛭石是一类层状结构的镁铝硅酸盐类粘土矿物, 层间含有水分子及可交换性阳离子, 其结构特点使之有良好的吸附性能和离子交换能力 (张宝述, 2007; 彭同江等, 2009)。蛭石原矿经高温煅烧, 其体积可迅速膨胀 8~20 倍, 结构水的脱出则主要引起层间距离的变化, 膨胀蛭石比表面积比原蛭石要大得多, 吸附性也相应增强 (胡光锁等, 2006a, 2006b)。这种无毒无害绿色环保的环境矿物材料正渐渐被应用于养殖业中。Hunter 和 Tompson (1973) 曾向实验鼠群注射蛭石浸出液未观察到病变的发生; Arunlertaree 等 (2007) 发现蛭石能够与黄曲霉毒素 B1 结合, 使对虾中毒率降低; 郭捡红等 (2009) 发现膨胀蛭石作为孵化介质时黄喉拟水龟卵的平均孵化期最短、孵化率最高, 且孵出幼体的个体相对较大, 并具有较强的运动能力。蛭石空隙间所含有的有益微量元素又是生物体内维生素、激素和酶系统不可缺少的成分, 具有特定的生物学功能。因其本身又具有絮凝性, 可被加工成粒状片状及粉末状等, 具有成本低、处理效果好的特点, 是一种有发展前途的环境矿物材料。

养殖池中的磷主要来自水生生物的代谢废物、残饵以及交换水体, 一旦磷大量输入超过水体的同化能力, 便会造成养殖环境恶化, 同时也会威胁水生

生物的生长 (Thakur and Lin, 2003)。降低养殖水体中磷含量已成为养殖水质调控的主要对象。本文以 KH_2PO_4 为模拟污染物, 通过原子吸收光谱法考察蛭石在对磷盐吸附过程中主要金属元素的变化规律, 并探究膨胀蛭石吸附水中磷的吸附平衡, 对吸附机理进行探讨。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

工业膨胀蛭石由河南省灵寿县灵燕矿产加工厂提供, 其主要组分的质量分数为 (%): SiO_2 37.26、 MgO 11.23、 Al_2O_3 9.36、 Fe_2O_3 3.59、 CaO 7.14。

称取一定质量的工业膨胀蛭石放入 50 mL 离心管内, 加入适量的无水乙醇, 控制固液比为 1:10, 混合液放入胶体磨中研磨, 弃去上清液, 将磨碎的蛭石放入烘箱中 80°C 烘干, 蒸馏水洗涤 3 次, 烘干过 80 目筛子备用。

实验仪器主要有 UV-2550 紫外可见分光光度计、TG16-WS 高速离心机、JRY-FC08 翻转振荡器。

1.2 实验方法

称取 200 mg 工业膨胀蛭石于 50 mL 离心管中, 加入浓度一定的 KH_2PO_4 (以磷的浓度 mmol/L 计, 下同) 溶液 40 mL, 按不同的时间和 pH 值等条件, 在一定温度下以 150 r/min 翻转振荡搅拌一定时间后, 离心分离, 测定清液中磷的浓度, 吸附量表达式如下:

$$q_e = (C_0 - C_e)V/m \quad (1)$$

式中, q_e 为平衡吸附量 (mg/g), C_0 为吸附溶液初始浓度 (mg/L), C_e 为吸附溶液平衡浓度 (mg/L), m 为吸附剂质量 (g), V 为溶液的体积 (L)。

1.3 分析方法

溶液中磷的浓度采用钼锑抗分光光度法 (国家环保总局, 2002), 由 UV-2550 紫外分光光度计测定, 实验所用试剂均为分析纯。金属元素浓度在浙江大学化学分析测试中心测定。溶液中金属元素 (Fe、K、Al、Ca、Mg、Zn) 浓度采用原子吸收光谱法 (AAS) 测定。

2 结果与讨论

2.1 工业膨胀蛭石吸附磷酸盐

2.1.1 初始 pH 值的影响

固定磷酸盐溶液和工业膨胀蛭石的初始浓度和

加入量,在不同 pH 值条件下进行翻转吸附,实验结果如图 1 所示。

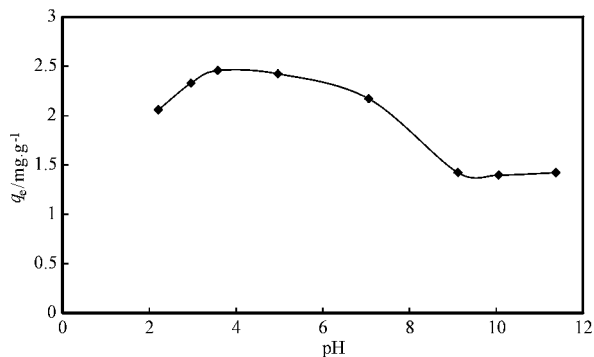


图 1 pH 值对吸附量的影响

Fig. 1 Effect of pH value on adsorption

图 1 为工业膨胀蛭石在不同 pH 值环境下吸附磷酸盐的关系图。从图中可见, pH 值在较低范围内 (2.0~8.0) 吸附剂有较高的吸附量, 吸附量远远高于 pH 值大于 9 时的吸附量, 说明工业膨胀蛭石对磷酸盐的吸附在酸性条件下进行更为有利。这是因为蛭石的等电点在 2.2~2.75 之间, 而 H_2PO_4^- 的存在 pH 值范围为 4~9。当溶液 pH 值由 2 上升到 2.75 的过程中, 工业蛭石表面正电荷逐渐消失至零电荷, KH_2PO_4 呈阳离子状态, 这样使得两者的静电斥力迅速下降, 导致吸附量明显增加; 当溶液 pH 值由 2.75 上升到 4 时, KH_2PO_4 由阳离子逐渐转化为分子, 此时工业膨胀蛭石表面由零电荷逐渐呈负电荷, 正负电荷相互吸引, 使得吸附量在此阶段达到最大值; 当溶液 pH 值从 4 升高到 9 时, 工业膨胀蛭石对磷酸盐的吸附量由 2.56 mg/L 下降到 1.42 mg/L, 这主要是因为此时工业膨胀蛭石表面带负电荷, 而 KH_2PO_4 呈阴离子状态, 两者静电斥力上升, 导致吸附量迅速下降。当溶液 $7 < \text{pH} < 9$ 时, 工业膨胀蛭石表面带负电荷, 而此时对磷酸盐的吸附量越来越小, 这说明 H_2PO_4^- 的吸附是通过表面络合吸附而非静电吸附。因此 pH 值为 4 时工业膨胀蛭石对磷酸盐的吸附量最大。

2.1.2 吸附时间的影响

模拟磷酸盐废水的初始浓度为 50 mg/L, 常温下用翻转振荡器振荡不同时间, 抽滤, 测定滤液中磷酸盐的质量浓度, 所得结果见图 2。

从图 2 可以看出, 工业膨胀蛭石对磷酸盐有较好的吸附作用, 在起初的 1 h 内吸附量增加很快, 之后增加幅度变缓, 至 4h 就能达到平衡, 说明 4h 的吸

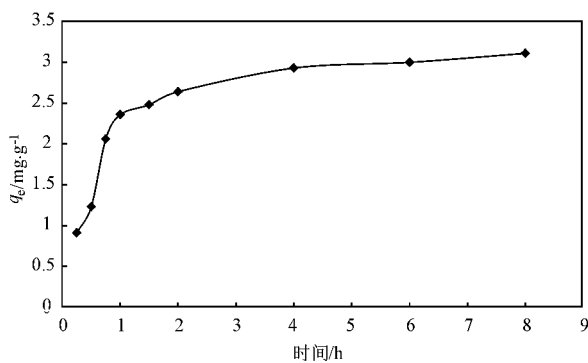


图 2 吸附时间对吸附量的影响

Fig. 2 Effect of agitating time on adsorption

附时间工业膨胀蛭石已将磷酸盐基本吸附完全, 因此蛭石的吸附时间确定为 6 h。

2.1.3 固液比的影响

固液比是吸附时吸附剂的用量 (g) 与吸附质体积 (L) 之间的比值。当固液比过小, 吸附剂用量不够时, 吸附质不能被完全被吸附, 若固液比过大, 则会造成吸附剂的浪费, 所以固液比的确定原则是在保证完全吸附的前提下尽量减少吸附剂的用量。

工业膨胀蛭石固液比对磷酸盐的吸附的影响见图 3。随着蛭石固液比的提高, 磷酸盐的吸附率逐渐增加, 当蛭石的固液比为 12.5 g/L, 磷酸盐的吸附率为 90.60%, 继续提高固液比, 蛭石的吸附量缓慢减小。蛭石的固液比在 2.5 g/L 至 12.5 g/L 之间时吸附量的减幅较大, 在 25 g/L 至 62.5 g/L 之间时吸附率的变化稳定呈近似线性。由图 3 还可以看出随着蛭石的固液比增加, 平衡吸附量急剧下降, 吸附去除率下降, 当固液比为 25 g/L 时, 平衡吸附量为 0.374 mg/g, 再增加固液比平衡吸附量趋于稳定。因此工业膨胀蛭石吸附磷酸盐的固液比确定为 12.5 g/L。

2.2 吸附前后材料表征对比

2.2.1 XRD 表征

对比吸附前后的工业膨胀蛭石进行 XRD 分析, 其中吸附后的材料采用吸附高浓度磷酸盐后, 采用自然风干后得到。

比较吸附前后的工业膨胀蛭石的 XRD 在小角区域谱图可以发现, 吸附磷酸盐后的衍射线较蛭石在相应区域的衍射线平坦, 即产生小角散射现象, 从某种程度上说明吸附后的材料较原土的层与层有序度差。相应地从图 4 中可以看到, 吸附磷酸盐后, 工业膨胀蛭石的层间距衍射峰变宽, 同时强度也减弱, 这些都说明随着磷酸盐以某种方式进入蛭石层间以

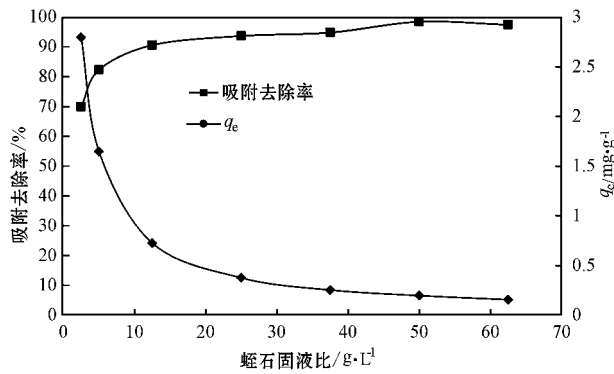


图 3 固液比对吸附量的影响

Fig. 3 Effect of solid-liquid ratio on adsorption

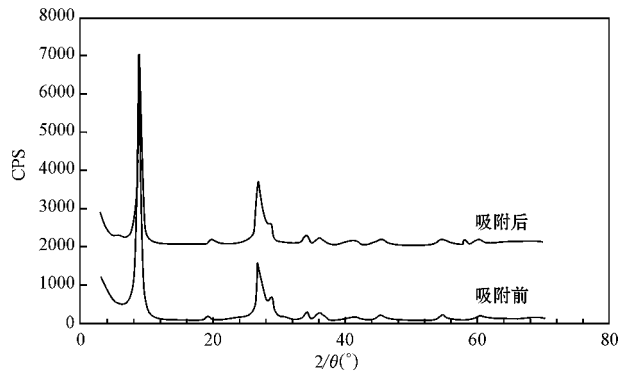


图 4 吸附前后蛭石的 XRD 谱图

Fig. 4 XRD patterns of industry expanded vermiculite

及硅氧四面体的空洞和八面体空位,层与层的有序度变弱。

2.2.2 SEM

由图 5a、图 5b 可见,工业膨胀蛭石表面平整,呈层状重叠,且层间排布较为紧密。吸附磷酸盐后,图

5c、5d 中蛭石仍有部分保持层状结构,但表面粗糙出现剥离现象,且明显分布有众多的光亮沉积物,有不规则点斑出现。无机微沉淀机制在磷酸盐的去除过程中有重要的贡献,这点可以从其他学者的研究中得到启发(Bryan *et al.*, 2013)。

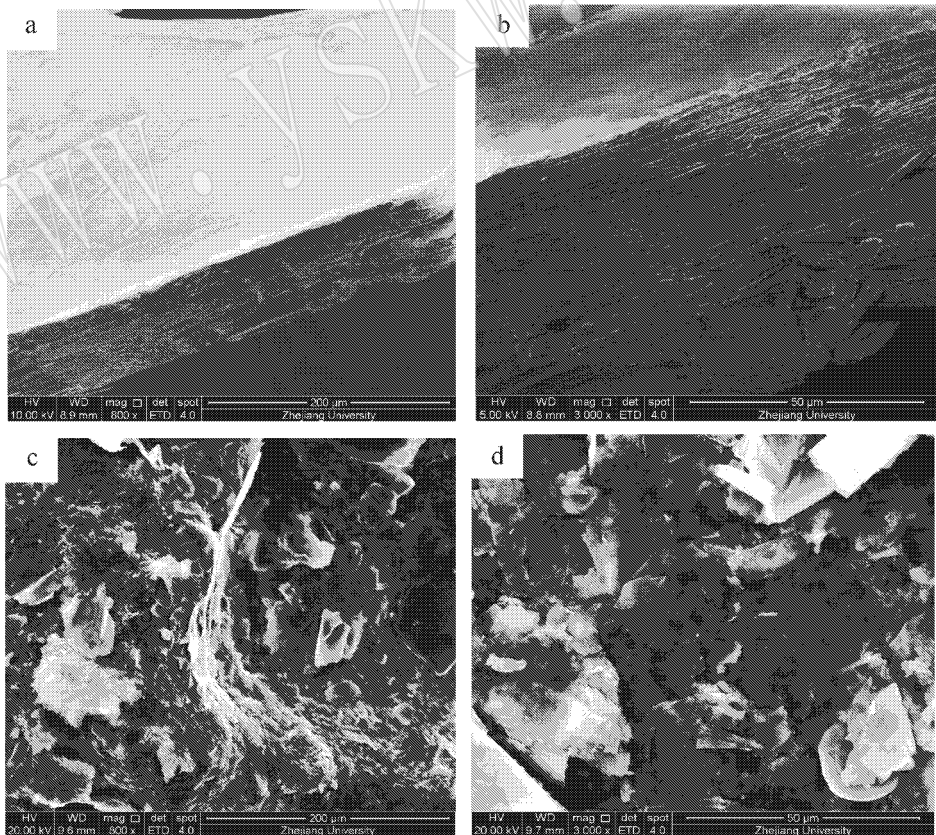


图 5 吸附前后蛭石的 SEM 图

Fig. 5 SEM images of industry expanded vermiculite

a—吸附前蛭石($\times 800$); b—吸附前蛭石($\times 3000$); c—吸附后蛭石($\times 800$); d—吸附后蛭石($\times 3000$)

a—vermiculite($\times 800$); b—vermiculite($\times 3000$); c—P adsorbed vermiculite($\times 800$), d—P adsorbed vermiculite($\times 3000$)

2.3 蛭石吸附磷酸盐的机理探讨

2.3.1 反应沉淀吸附

在不同初始浓度的 KH_2PO_4 溶液经过工业膨胀蛭石 6 h 的吸附后测定溶液中几种金属元素的浸出含量,表 1 列出了各组溶液吸附 6 h 后的金属含量。

表 1 不同初始浓度溶液中金属元素的溶出含量 mg/L
Table 1 Leaching of metallic elements with different initial concentrations

初始浓度	K	Fe	Ca	Mg	Al
0	9.5	5.50	7.0	1.28	1.150
50	11.0	0.56	9.0	1.65	0.010
100	17.5	0.29	15.5	3.00	0.017
250	33.5	0.12	29.0	5.50	0.026

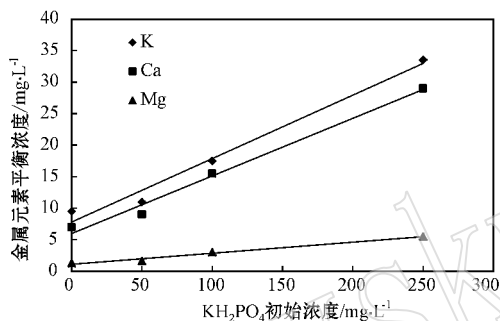


图 6a 结果显示, K、Ca、Mg 这 3 种金属元素随着 KH_2PO_4 初始浓度的升高浸出含量增加,并呈现很好的线性关系,溶液中作为吸附质的 KH_2PO_4 的 K 离子浓度随着 KH_2PO_4 浓度升高而升高,但 K 浓度增加的速率远比理论上要低。这是因为蛭石是一种很好的无机阳离子交换剂,蛭石属层状矿物,其层间充填有 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Al^{2+} 等大小合适的可交换阳离子。蛭石颗粒在与 KH_2PO_4 电解质溶液接触时,发生了离子交换过程。K 通过液膜扩散移动到蛭石颗粒表面,继而以粒内扩散的方式进入蛭石层间并向交换位点移动,在某一位置 K 与无机可交换阳离子发生化学置换反应,交换后的阳离子由交换

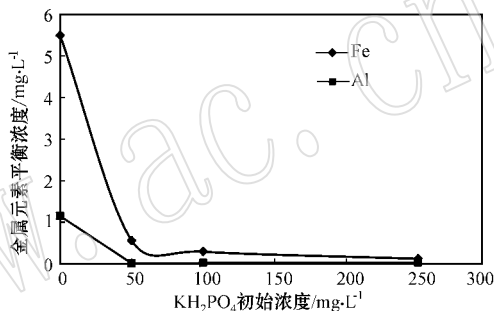


图 6 不同初始浓度对金属元素浸出的影响

Fig. 6 Effect of initial concentration on metal extractions

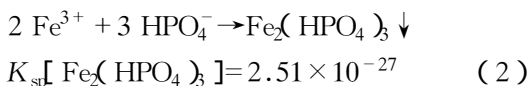
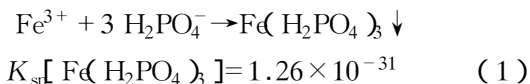
位点移动到蛭石颗粒表面最后扩散至溶液。本实验中被交换出来的 Ca、Mg、Fe、Al 元素含量随着溶液中 K 浓度的增加而增加,这一现象与 Ogwada 和 Sparks(1986)研究的蛭石 K 与 Ca 的离子交换动力学结论吻合。图 6b 中可见,Fe、Al 元素随着 KH_2PO_4 浓度的升高含量大幅降低,与 Ca、Mg 元素含量的变化趋势相反。当溶液为去离子水时,Fe、Al 元素有较高的溶出量,溶出量要远远高于溶液为磷酸盐时的溶出量,但当溶液中含有 KH_2PO_4 时,Fe、Al 元素溶出量急剧降低。这是因为 Fe、Al、Ca、Mg 元素原本存在于蛭石颗粒的层间空隙内,通过与 K 的离子交换作用扩散至表面,在水分子的作用下部分 Fe、Al、Ca、Mg 元素脱离蛭石表面进入水溶液内,此时溶液中金属元素含量增加,在吸附实验的条件下, pH 值为 6.85 的 KH_2PO_4 溶液中主要以 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 两种状态存在,如果金属元素 M^{2+} 和 HPO_4^{2-} 的乘积大于 MHPO_4 的溶度积,溶液中就会有 MHPO_4 沉淀产生,产生的沉淀吸附在蛭石表面,因此吸附后的溶液中金属元素减少。表 2 列出了各相关金属元素与 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 的化合物

表 2 相关无机磷酸化合物的溶度积

Table 2 Solubility product of inorganic phosphate compounds

化合物	溶度积	化合物	溶度积
$\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$	1.26×10^{-31}	KH_2PO_4	易溶于水
$\text{Fe}_2(\text{HPO}_4)_3$	2.51×10^{-27}	KHPO_4	易溶于水
$\text{Al}(\text{OH})(\text{H}_2\text{PO}_4)$	难溶于水	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	1.0×10^{-3}
MgHPO_4	5×10^{-6}	CaHPO_4	2.7×10^{-7}

的溶度积。以 Fe 元素为例, Fe^{3+} 能与 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 反应形成螯合物, 25℃ 时 $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 与 $\text{Fe}_2(\text{HPO}_4)_3$ 的溶度积如下:



根据本实验吸附等温线拟合后所得到的蛭石对 KH_2PO_4 的最大吸附量为 2.76 mg/g, 溶液中 Fe 元素的浓度与 H_2PO_4^- 的乘积为 $1.32 \times 10^{-11} > K_{sp}[\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3] = 1.26 \times 10^{-31}$, 产生了 $\text{Fe}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ 沉淀,

水体中的磷元素由生物能利用的形态转变为生物不能利用的形态,达到水质调控的目的(Westholm, 2006)。同理,Al 能与 H_2PO_4^- 发生反应生成不溶于水的化合物(Tsalakanidou, 2006; Karczmarczyk and Renman, 2011)。因此, H_2PO_4^- 被蛭石所吸附的同时, Fe、Al 元素也相应减少。

2.3.2 吸附等温线

分析吸附等温线对于吸附实验有着重要的意义,吸附等温线能够反映吸附剂的吸附量及吸附质的平衡浓度,而其曲线形状也能够说明吸附质的吸附特点。根据低浓度时的斜率可以将吸附等温线分为 6 大类,其中最常见并且使用最频繁的就是 Langmuir 公式和 Freundlich 公式。

Langmuir 公式是基于这样一种假设,随着吸附剂中的吸附位被覆盖,吸附质分子越来越难碰撞到表面吸附位上,也就是吸附质分子在吸附剂表面不是垂直排列或者同吸附剂表面的溶剂分子没有强烈的竞争,吸附的分子呈单层覆盖,Langmuir 公式能够估算吸附质的最大吸附量。表达式如下:

$$C_e/q_e = C_e/q_0 + 1/bq_0 \quad (3)$$

式中, C_e 为吸附质的平衡质量浓度(mg/g), q_e 为单位质量吸附剂所吸附的磷酸盐的质量(mg/g), q_0 为最大吸附量(mg/g), b 是与吸附性能有关的常数。

Freundlich 公式认为随着吸附剂浓度越来越高,吸附量也会增加,这在热力学上是不可能的。Freundlich 公式是经验公式,不能从理论上进行推导,但是能够估算出吸附强度。其表达式如下:

$$\lg q_e = \lg k_f + (1/n) \lg C_e \quad (4)$$

式中, k_f 为吸附系数, n 为常数。 n 值影响吸附性能, $1/n$ 值越小,吸附性能越好。一般认为 $1/n = 0.1 \sim 0.5$, 容易吸附; $1/n > 2$ 时,则难于吸附。

图 7 为工业膨胀蛭石对磷酸盐吸附等温线,

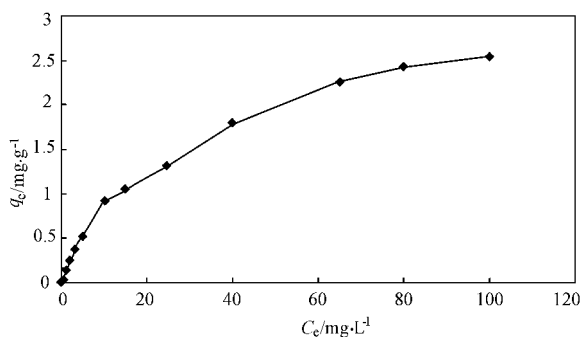


图 7 吸附等温线

Fig. 7 Adsorption isotherm

时间为 24 h, 温度 25°C , pH 值为 6.85。可以看出,在所研究的浓度范围内,工业膨胀蛭石对磷酸盐的平衡吸附量随着磷酸盐初始浓度的升高而增大。这是因为溶液中磷酸盐质量浓度愈大,可供吸附的磷酸盐越多,溶液本体与膨胀蛭石表面形成的浓度差愈大,造成磷酸盐向内部迁移,吸附反应的动力增大,膨胀蛭石对磷酸盐的吸附量增加,这与 Freundlich 吸附等温式的吸附规律完全一致。

利用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温模型对试验数据拟合,得到的线性方程与相关参数和相关系数见图 8 与表 3。结果表明膨胀蛭石对磷酸盐的吸附均符合 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温式,说明在实验范围内膨胀蛭石对磷酸盐的吸附可近似用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温式来描述,但用 Freundlich 吸附等温方程式拟合的相关性更好,其中 $1/n$ 为 0.497,说明容易吸附水中的磷酸盐。

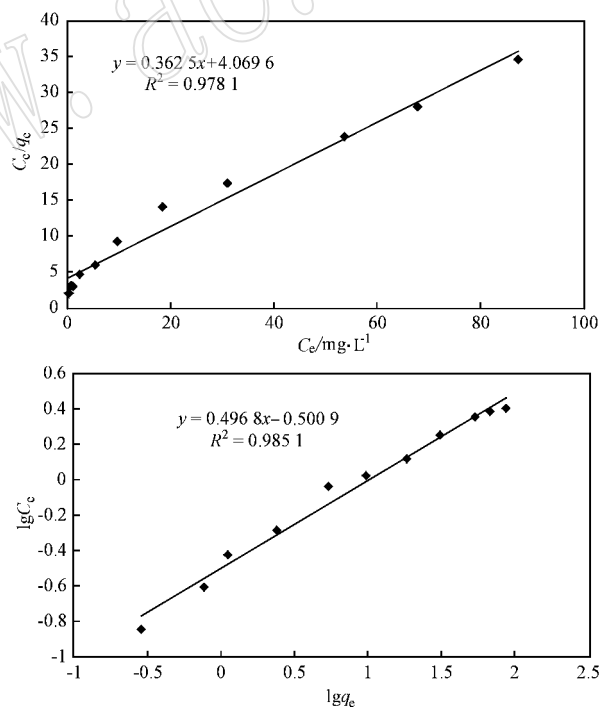


图 8 Langmuir 吸附等温线和 Freundlich 吸附等温线
Fig. 8 Langmuir adsorption isotherm and Freundlich adsorption isotherm

表 3 吸附等温方程的线性拟合参数

Table 3 Regression equations for adsorption isotherm

T/K	Langmuir			Freundlich		
	b (L/mg)	q_0 (mg/g)	R^2	k (mg/g)	$1/n$	R^2
302	0.6779	2.76	0.9781	0.316	0.497	0.9851

2.3.3 蛭石的回收利用

用工业膨胀蛭石吸附磷可以不用解析,直接用作承载肥料(N、P、K 和微量元素)基质,不仅对养殖污水进行了处理,而且提高了蛭石作为农业化肥的应用潜力,使肥料营养组分在生长培养基中缓慢释放,从而提高肥料利用率并延长肥效。此外,蛭石还具有较高的阳离子交换能力,可防止土壤酸碱度的迅速变化,并保护农作物免遭高浓度肥料的毁坏,在废物回收(用作肥料)方面具有很好的发展前景。

3 结论

(1) 在 pH 值较低范围内(2.0~8.0),蛭石对 KH_2PO_4 有较高的吸附量,pH>9 时工业膨胀蛭石对磷酸盐的吸附量较低且趋于稳定。

(2) 吸附等温曲线均符合 Freundlich 公式与 Langmuir 公式,相关系数分别为 0.978 1 和 0.985 1。

(3) 蛭石对富营养化水体中磷酸盐的吸附主要是通过离子交换作用置换出存在于蛭石层间的 Fe、Al 离子,Fe、Al 离子与水体中 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 发生化学反应形成沉淀吸附于蛭石表面,从而去除水体中的磷酸盐。

(4) 以蛭石作为养殖废水处理的吸附剂,不仅能够吸附过量的 P 调节水质平衡,还能增加水体中作为生物生化酶的辅助因子的必需金属元素,增强水生生物的抵抗力,有利于水生生物生长。

References

Arunlertaree C, Soonngam L and Hutacharoen R. 2007. Vermiculite and hydrated sodium calcium aluminosilicates as the agent of aflatoxin in B1 absorption for black tiger shrimp diets[J]. *Environment and Natural Resources Journal*, 5(1): 50~58.

Bryan M, Spears M and Sebastian A A. 2013. Comparison of phosphorus(P) removal properties of materials proposed for the control of sediment p release in UK lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 442: 103~110.

Funge-Smith S J and Matthew R P. 1998. Nutrient budgets in intensive shrimp ponds: implications for sustainability[J]. *Aquaculture*, 164(1~4): 117~133.

Guo Jianhong, Zhao Weihua, Wei Chengqing, et al. 2009. Effects of three different incubation media on incubation length, hatching success and hatchling's traits in yellow pond turtle(*Mauremys mutica* Cantor)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 33(2): 253~258(in

Chinese with English abstract).

Hu Guangsuo, Li Zhengyi, Zhu Yongping, et al. 2006b. Preparation of vermiculite powder with high expansion and high quality—II. Thermal expansion of vermiculite[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 6(5): 763~767(in Chinese with English abstract).

Hu Guangsuo, Zhu Yongping, Li Zhengyi, et al. 2006a. Preparation of vermiculite powder with high expansion and high quality—I. Primary study on the expansion mechanism[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 6(2): 205~209(in Chinese with English abstract).

Karczmarczyk A and Renman G. 2011. Phosphorus accumulation pattern in a subsurface constructed wetland treating residential wastewater[J]. *Water*, 3(1): 146~156.

Lu Anhuai. 1999. The Application of environmental mineral materials to the treatment of contaminated soil, water and air[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 18(2): 294~300(in Chinese with English abstract).

Lu Anhuai. 2001. Basic properties of environmental mineral materials: natural self-purification of inorganic minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(4): 371~381(in Chinese with English abstract).

Ogwada R A and Sparks D L. 1986. A Critical Evaluation on the Use of Kinetics for Determining Thermodynamics of Ion Exchange in Soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 50(2): 300~305.

Peng Tongjiang, Sun Hongjuan, Sun Jinmei, et al. 2009. Research on the affecting factors of cation exchanging capacity of phlogopite-vermiculite interstratified mineral[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(1): 14~19(in Chinese with English abstract).

Rabalais N N, Turner R E and Diaz R J. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 66(7): 1528~1537.

State Environmental Protection Administration. 2002. Monitoring and Analysis Methods of Water and Waste Water[M]. Beijing: Chinese Environmental Sciences Press, 246~248(in Chinese).

Thakur D P and Lin C K. 2003. Water quality and nutrient budget in closed shrimp(*Penaeus mondon*) culture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 27(1): 159~176.

Tsalakanidou I. 2006. Potential of reactive filter materials for small-scale wastewater treatment in Greece[D]. Royal Institute of Technology (KTH).

Westholm L J. 2006. Substrates for phosphorus removal-potential benefits for on-site wastewater treatment[J]. *Water Research*, 40(1): 23~36.

Xu Hai, Hans W P, Qin Boqiang, et al. 2010. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China[J]. *Limnology and Oceanography*, 55(1): 420~432.

Zhang Baoshu, Song Haiming, Wang Lisheng, et al. 2007. Study on

kinetics of $2\text{Na}^+ = \text{Pb}^{2+}$ cations exchange process in Na-vermiculites [J]. Journal of Functional Materials, 38(5): 790~794 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

郭捡红, 赵伟华, 魏成清, 等. 2009. 三种孵化介质对黄喉拟水龟卵孵化期、孵化成功率和孵出幼体特征的影响[J]. 水产学报, 33(2): 253~258.

国家环保总局. 2002. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 246~248.

胡光锁, 李政一, 朱永平, 等. 2006b. 高膨胀率高质量蛭石粉体研制—II. 热膨胀机理初探[J]. 过程工程学报, 6(5): 763~767.

胡光锁, 朱永平, 李政一, 等. 2006a. 高膨胀率高质量蛭石粉体研制—I. 热膨胀机理初探[J]. 过程工程学报, 6(2): 205~209.

鲁安怀. 1999. 环境矿物材料基本性能——无机界矿物天然自净化功能[J]. 岩石矿物学杂志, 18(2): 294~300.

鲁安怀. 2001. 环境矿物材料在土壤-水体-大气污染治理中的利用[J]. 岩石矿物学杂志, 20(4): 371~381.

彭同江, 孙红娟, 孙金梅, 等. 2009. 金云母-蛭石间层矿物阳离子交换容量的影响因素研究[J]. 矿物岩石, 29(1): 14~19.

张宝述, 宋海明, 王励生, 等. 2007. Na型蛭石中 $2\text{Na}^+ = \text{Pb}^{2+}$ 离子交换过程的动力学研究[J]. 功能材料, 38(5): 790~794.

《硅酸盐通报》征稿启事

《硅酸盐通报》是中国硅酸盐学会的会刊, 由中国硅酸盐学会和中材人工晶体研究院有限公司联合主办; 月刊, 大 16 开, 250 页; 是中文核心期刊, 第 2 届中国精品科技期刊, 被美国《化学文摘》(CA) 检索及“中国学术期刊网”全文收录, 在国内无机非金属材料行业有较大影响。

《硅酸盐通报》主要报导: 高技术陶瓷、水泥、玻璃、建材、耐火材料、人工晶体、非金属矿及复合材料等相关领域中科学技术研究方面的创新和成果, 交流生产和技术经验, 追踪硅酸盐行业的前沿发展与动态。旨在全面提升行业科研、生产、教学、设计、管理等学术水平和技术创新能力, 追逐专业制高点, 为促进国内外无机材料领域的发展服务。

《硅酸盐通报》现为月刊出版, 投稿程序简单方便、审稿专业速度快、发表周期短、影响力大, 欢迎相关方面的专家、学者和技术人员赐稿, 编辑部将竭力为您的劳动成果登上展示平台服务。

主编室: 010—65492963

投稿咨询: 010—65492968,

传真: 010—65493320

010—65492826/2861/2635 转 8411

投稿邮箱: gsy123@126.com

网 址: <http://www.jtxb.cn>

地 址: 100018 北京市朝阳区东坝红松园 1 号人工晶体研究院