



Ce-Zn 复合吸附剂的制备及除磷性能研究

李秀玲, 梁瀚予, 钟兰燕, 韦岩松

(河池学院化学与生物工程学院, 广西宜州 546300)

[摘要] 以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为原料, 采用共沉淀法制备 Ce-Zn 复合吸附剂, 利用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)、X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)对其进行表征, 对吸附过程进行动力学和热力学拟合, 通过正交实验确定吸附除磷的最佳工艺条件, 并对吸附剂进行再生处理, 研究其可循环利用性能。结果表明, 复合吸附剂表面生成了水合氧化铈和氧化锌颗粒, 表面粗糙, 呈多孔结构; 磷酸盐离子取代复合吸附剂表面的金属羟基是吸附除磷的主要原因。除磷最佳工艺条件: 磷初始质量浓度为 5 mg/L, pH 为 4, Ce-Zn 复合吸附剂投加量为 0.07 g、反应时间为 240 min; 吸附过程符合 Freundlich 等温模型和准二级动力学方程, 反应自发进行, 且为吸热反应; 利用碱液对吸附剂进行 3 次循环脱附再生, 对磷的去除率保持在 90% 以上, 证明该吸附剂可以循环使用。

[关键词] 复合吸附剂; 除磷; 吸附

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)05-0107-07

Study on preparation and phosphorus removal performance of Ce-Zn composite adsorbent

LI Xiuling, LIANG Hanyu, ZHONG Lanyan, WEI Yansong

(College of Chemical and Biological Engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China)

Abstract: Using $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ as raw materials, the Ce-Zn composite adsorbent was prepared by co-precipitation method, and was characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The adsorption process was fitted by kinetics and thermodynamics. The optimum process conditions for phosphorus removal were determined by orthogonal experiment. The adsorbent was regenerated to study its recycling performance. The results showed that hydrated cerium oxide and zinc oxide particles were formed on the surface of the composite adsorbent, and the surface was rough and porous. The main reason for phosphorus removal was that phosphate ions replaced the metal hydroxyl groups on the surface of the composite adsorbent. The optimum conditions for phosphorus removal were as follows: initial phosphorus concentration of 5 mg/L, pH 4, dosage of 0.07 g, and time of 240 min. The adsorption process conformed to the Freundlich isotherm model and the quasi-second-order kinetic equation. The reaction was spontaneous and endothermic. The adsorbent was recycled by lye for three times, and the phosphorus removal rate was kept above 90%, which proved that the adsorbent could be recycled.

Key words: compound adsorbent; phosphorus removal; adsorption

随着社会的发展,大量含磷的工业废水、农田退水和城镇居民生活污水排向河流、湖泊、海洋,造成了水体富营养化^[1],直接影响着生活饮用水水质和周围居民的身体健康,因此,减轻水体富营养化程度对保障饮用水安全意义重大。

目前常用的除磷方法有生物法^[2-3]、吸附法^[4]、

化学沉淀法^[5]、离子交换法^[6]和结晶法^[7]等。吸附法是基于吸附剂比表面积大、孔隙率高、表面富含多种官能团等特性,对磷具有较好的吸附性能^[8];该方法运行可靠^[9]、吸附容量大、污染少、吸附剂性能稳定、易再生,目前被广泛采用^[10-11]。

铈是资源量最大的稀土元素,铈基吸附剂具有

[基金项目] 2021 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY0616);2022 年自治区级大学生创新训练计划立项项目(S202210605052)

对环境友好、抗酸碱能力强、稳定性高等独特优势,多用于除砷除氟,而且对磷酸盐具有优良的吸附性能和较高的选择性^[12-13],因而成为目前除磷吸附剂的首选。吴秋月等^[14]研究了锰与铈复合氧化物的除磷性能,溶液 pH 对吸附除磷影响较为明显,随着 pH 的升高,磷去除率降低。鉴于铈基吸附剂除磷的相关研究较少的现状,实验首次以 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为原料,采用共沉淀法制备铈锌复合吸附剂用于水中磷酸盐的吸附,通过各种表征方法明确除磷的机理,为含磷废水的治理及缓解水体的富营养化问题提供一定的数据参考和技术支持。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

试剂:磷酸二氢钾(优级纯)、六水合硝酸锌、六水合硝酸铈、硫酸、盐酸、氢氧化钠、抗坏血酸、酒石酸锑钾、钼酸铵均为分析纯,购自西陇科学股份有限公司。

仪器:DHG-9245A 型台式恒温鼓风干燥箱,上海齐欣科学仪器有限公司;DF-101S 型集热式恒温加热磁力搅拌器,上海立辰邦西仪器科技有限公司;ZWY-1102C 型双层恒温培养振荡器,上海智城分析仪器制造有限公司;UV-5100 型 721 分光光度计,上海元析仪器有限公司;NICOLET6700 型傅里叶红外光谱仪,美国赛默飞世尔;MINIFLEX60 型 X 射线衍射仪,深圳市莱雷科技发展有限公司;HITACHI SU8020 型扫描电子显微镜,日本日立仪器有限公司。

1.2 吸附剂的制备

称取一定质量的 $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,使 Ce 与 Zn 的物质的量比为 1:1,加水溶解,调节溶液 pH 至 10.8,在 25 °C 下搅拌 3 h,再静置 12 h。然后将沉淀物洗涤 3~4 次后置于 55 °C 烘箱中干燥 12 h,再于 400 °C 的马弗炉中焙烧 2 h,冷却后研磨成粉末状即可获得 Ce-Zn 复合吸附剂。单一金属氧化物的制备方法和步骤与上述方法相同。

1.3 样品表征

通过 XRD 分析 Ce-Zn 复合吸附剂的成分和内部的形态结构等化学性质;通过 FT-IR 分析 Ce-Zn 复合吸附剂存在的基团和结构等;通过 SEM 分析 Ce-Zn 复合吸附剂的形貌特征。

1.4 含磷模拟废水的配制

用 KH_2PO_4 配制磷标准溶液,稀释成不同浓度的

磷中间液和磷使用液,磷使用液现配现用。

1.5 实验方法

固定吸附实验所用废水体积为 50 mL,摇床转速为 175 r/min,吸附实验在 250 mL 锥形瓶中进行,改变不同的实验条件,研究各因素对除磷的影响。吸附结束后用 0.45 μm 水系膜对废水进行过滤,采用分光光度法测定其剩余磷浓度,以磷去除率和吸附量作为评价指标,计算公式如下:

$$Q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

式中: Q_e ——平衡吸附量,mg/g;

C_0 ——初始质量浓度,mg/L;

C_e ——平衡质量浓度,mg/L;

V ——含磷模拟废水的体积,mL;

m ——Ce-Zn 复合吸附剂投加量,g。

为研究 Ce-Zn 复合吸附剂的吸附除磷机理,对吸附过程进行了 Langmuir、Freundlich 等温线拟合、Van't Hoff 热力学拟合以及准一级和准二级动力学拟合。为了实现吸附剂的循环利用,本实验对吸附剂开展了脱附再生实验。

2 结果与分析

2.1 Ce-Zn 复合吸附剂的 XRD 表征结果及分析

Ce-Zn 复合吸附剂的 XRD 如图 1 所示。

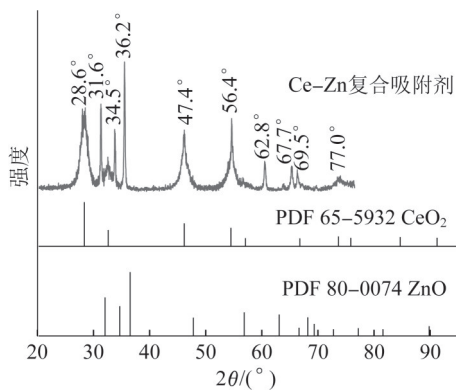


图 1 Ce-Zn 复合吸附剂与标准卡片 XRD

Fig. 1 XRD pattern of Ce-Zn composite adsorbent and standard card

由图 1 可知,在 2θ 分别为 28.6°、31.6°、33.2°、34.5°、36.2°、47.4°、56.4°、62.8°、67.7°、69.5°、77.0° 的位置出现了特征衍射峰。与标准图谱 PDF80-0074 和 PDF65-5932 对比发现,在 2θ 分别为 28.5°、33.2°、34.5°、36.2°、47.4°、56.4°、69.5°、77.0° 出现的特征衍射峰与氧化铈

的特征衍射峰一致,说明合成的吸附剂出现了类似氧化铈的结构;而在 31.6° 、 34.5° 、 36.2° 、 47.4° 、 56.4° 、 62.8° 、 67.7° 出现的特征衍射峰与氧化锌的特征衍射峰一致,说明合成的吸附剂存在氧化锌,吸附剂的制备较为成功。

2.2 Ce-Zn复合吸附剂的FT-IR表征结果及分析

Ce-Zn复合吸附剂吸附磷前后的FT-IR如图2所示。

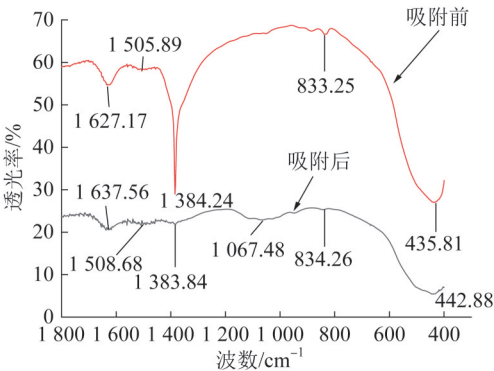
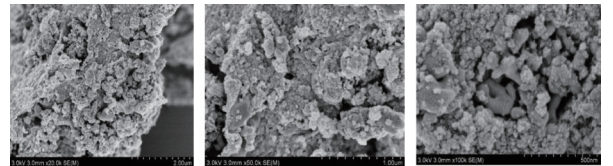


图2 Ce-Zn复合吸附剂吸附前和吸附后的FT-IR
Fig. 2 The FT-IR spectra of the Ce-Zn composite adsorbents before and after adsorption

由图2可知,在 1627.17 cm^{-1} 处的吸收峰是水分子的 $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ 弯曲振动峰, 1505.89 cm^{-1} 处出现的吸收峰是 $\text{Ce}-\text{OH}$ 的弯曲振动峰^[15]。吸附后在 1067.48 cm^{-1} 处出现了1个新的吸收峰是 $\text{P}-\text{O}$ 的伸缩振动峰,说明磷酸盐被吸附在吸附剂表面,这是由于磷酸根离子在金属活性位点发生配位、表面羟基与磷酸盐发生配位体交换所致^[16]。

2.3 Ce-Zn复合吸附剂的SEM表征结果及分析

Ce-Zn复合吸附剂吸附磷前后的SEM如图3所示。



(a) 吸附前,20 000倍 (b) 吸附前,50 000倍 (c) 吸附后,100 000倍

图3 Ce-Zn复合吸附剂吸附前后的SEM

Fig. 3 The SEM spectra of the Ce-Zn composite adsorbents before and after adsorption

由图3可知,Ce-Zn复合吸附剂的表面粗糙,有许多的细小颗粒附着在吸附剂的表面,堆积形成了多孔结构,从而增大了吸附剂与磷酸盐的接触面积,可以提供更多的吸附位点;吸附磷后,复合吸附剂表面的形貌特征发生了一定的变化,在复合吸附剂表

面及孔隙内有纳米级的细小沉积物生成,根据FT-IR的表征结果可知,纳米级的细小沉积物应该为磷酸盐沉积物,证明了除磷反应的发生。

2.4 Ce-Zn复合吸附剂的磷吸附行为研究

2.4.1 含磷废水浓度对除磷性能的影响

取体积为50 mL,Ce-Zn复合吸附剂投加量为0.05 g,调节pH至6.0,改变含磷废水浓度,在温度为 25°C 、 175 r/min 的摇床中振荡4 h,振荡完成后取上清液测定吸光度,等温线拟合结果如图4所示,拟合参数如表1所示。

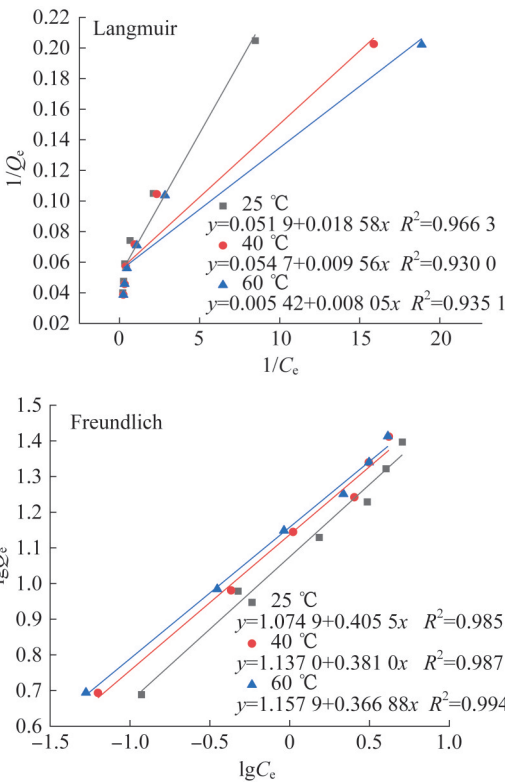


图4 等温吸附拟合曲线

Fig. 4 Isothermal adsorption fitting curves

表1 吸附等温线拟合参数

Table 1 Adsorption isotherm fitting parameters

温度/ ℃	Langmuir模型			Freundlich模型		
	$Q_m/$ ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	K_L	R^2	$1/n$	K_F	R^2
25	19.49	0.362	0.966 3	0.405 5	11.884	0.984 5
40	18.28	0.174	0.930 0	0.381 2	12.986	0.987 0
60	18.45	0.148	0.935 1	0.368 9	14.359	0.994 7

由表1可知,Freundlich等温模型的 R^2 较大,可以更好地描述Ce-Zn复合吸附剂的吸附除磷过程,

说明该吸附剂吸附磷酸盐为多层吸附过程^[17]; $1/n < 0.5$, 吸附过程易进行。

2.4.2 反应时间对除磷性能的影响

取50 mL, 10 mg/L的含磷模拟废水, 调节溶液pH至6.0, Ce-Zn复合吸附剂的投加量为0.05 g, 在温度为25℃, 175 r/min的摇床中分别振荡0.5、1、2、3、4、5、6、7 h。得到的准一级和准二级动力学曲线如图5所示, 动力学拟合参数如表2所示。

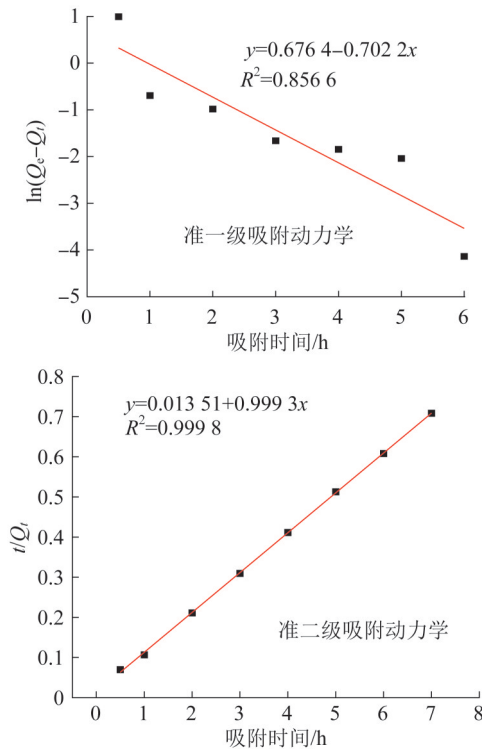


图5 Ce-Zn复合吸附剂对磷的吸附动力学拟合曲线

Fig. 5 Kinetic fitting curves of phosphorus adsorption with Ce-Zn composite adsorbent

表2 Ce-Zn复合吸附剂对磷的吸附动力学拟合参数

Table 2 Kinetic fitting parameters of Ce-Zn composite adsorbent for phosphorus adsorption

准一级吸附动力学模型			准二级吸附动力学模型		
$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	k_1/h^{-1}	R^2	$Q_e/(mg \cdot g^{-1})$	$k_2/(g \cdot mg^{-1} \cdot h^{-1})$	R^2
1.976	1.6172	0.8566	10.070	7.353	0.9998

由表2可知, 准二级吸附动力学模型的 R^2 较高, 说明吸附过程符合准二级吸附动力学方程, 以化学吸附为主。在吸附初期, 吸附剂具有较多的活性位点, 液固两相磷浓度差较大, 扩散快, 吸附速率高; 后期吸附趋于饱和, 速率逐渐放缓, 直至达到平衡^[18-19]。

2.4.3 温度对除磷性能的影响

在体积为50 mL, pH为6.0, Ce-Zn复合吸附剂投加量为0.05 g的条件下, 改变含磷模拟废水浓度, 分别在25、40、60℃, 175 r/min的摇床中振荡4 h, 振荡完成后取上清液测定吸光度。以 $\ln K$ 对 $1/T$ 做图并进行线性拟合, 结果如图6所示, 可以求出焓变(ΔH)和熵变(ΔS)^[20-21], 再根据吸附数据, 以 $\ln(Q_e/C_e)$ 对 Q_e 做图并进行线性拟合, 结果如图7所示, 截距即为 $\ln K$ ^[22]。

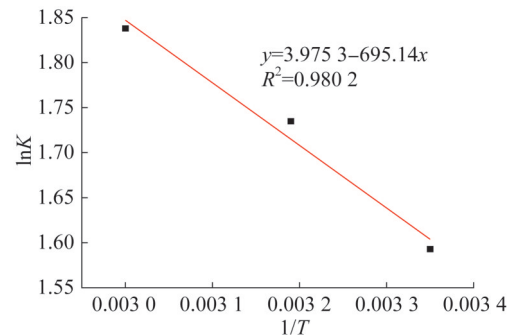


图6 热力学拟合曲线

Fig. 6 Thermodynamic fitting curve

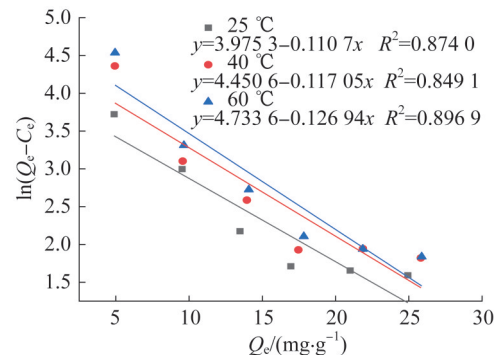


图7 吸附热力学拟合

Fig. 7 Adsorption thermodynamic fitting

由图6、图7可知, 温度会对吸附平衡产生一定的影响, 随着温度的升高, 吸附平衡常数增大, 有利于吸附反应的进行。对实验数据进行处理, 结果如表3所示。

表3 吸附热力学拟合参数

Table 3 Adsorption thermodynamic fitting parameter

$\Delta G/(kJ \cdot mol^{-1})$			$\Delta S/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	$\Delta H/(kJ \cdot mol^{-1})$
25℃	40℃	60℃		
-9.848	-12.548	-14.008	0.4781	83.61

由表3可知, 25、40、60℃的 ΔG 均为负值, ΔH 、 ΔS 均为正值, 表明吸附除磷过程是自发的, 且为吸热反应。

2.4.4 吸附剂投加量对除磷性能的影响

取50 mL 10 mg/L的含磷模拟废水,吸附剂投加量分别为0.005、0.01、0.03、0.05、0.07、0.1 g,调节pH至6.0,温度为25℃,以175 r/min振荡4 h,结束后测定剩余浓度,考察吸附剂投加量对除磷性能的影响,结果如图8所示。

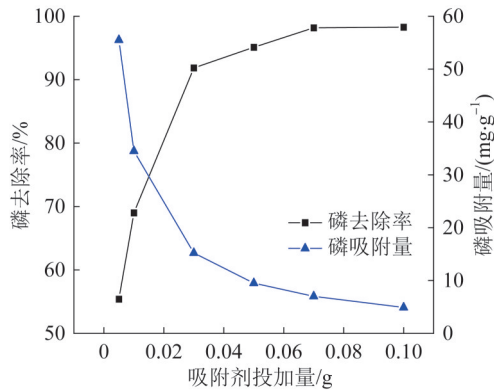


图8 吸附剂投加量对除磷性能的影响
Fig. 8 Effect of adsorbent dosage on phosphorus removal performance

由图8可知,随着吸附剂投加量的增加,磷去除率先上升后趋于稳定,在吸附剂投加量为0.07 g时达到平衡,这是由于尽管活性位点较多,但磷的初始浓度不变,提供的磷酸根离子数量有限,从而被吸附到吸附剂表面的磷酸根离子也有限^[23]。考虑经济性,后续的研究吸附剂投加量继续选用0.05 g。

2.4.5 废水pH对除磷性能的影响

取50 mL 10 mg/L废水,Ce-Zn复合吸附剂投加量为0.05 g,调节不同pH,温度为25℃,以175 r/min振荡4 h,结束后测定剩余浓度,考察pH对吸附剂除磷性能的影响,结果如图9所示。

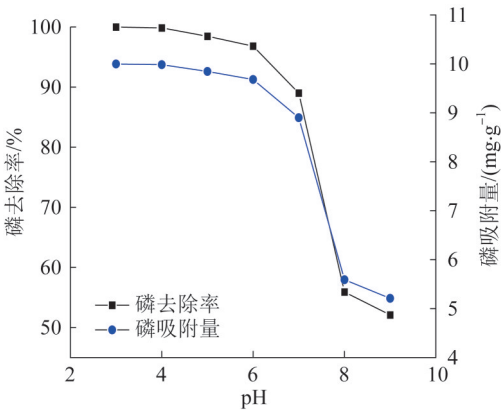


图9 pH对吸附剂除磷性能的影响
Fig. 9 Effect of pH on phosphorus removal performance of adsorbents

由图9可知,在酸性条件下,Ce-Zn复合吸附剂对磷的去除效果较好,随着pH的上升,Ce-Zn复合吸附剂对磷的去除率和吸附量降低,这主要是因为Ce-Zn复合吸附剂除磷的机理主要基于磷酸根离子在金属活性位点发生配位,表面羟基与磷酸盐发生配位交换。

在水溶液中,磷的主要存在形态为 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} ^[24],溶液显酸性时,溶液中以 H_2PO_4^- 居多,较低的pH有助于吸附剂表面质子化,可增加吸附剂表面的正电荷,从而增加了吸附剂表面与 H_2PO_4^- 之间的静电引力,导致对磷的去除率升高;反之,在碱性条件下,较高的pH会使吸附剂表面带负电荷,从而使 H_2PO_4^- 与吸附剂表面产生较强的静电斥力,导致吸附效果变差^[25]。

2.5 吸附正交实验

根据单因素实验结果,设计正交实验,实验结果及极差分析如表4所示。

表4 正交实验结果及极差分析

Table 4 Orthogonal experiment results and range analysis					
序号	A:时间/ min	B:Ce-Zn 复合吸附剂 投加量/g	C:初始质量 浓度/ (mg·L ⁻¹)	D:pH	去除 率/%
1	120	0.03	5	4	98.66
2	120	0.05	15	6	85.66
3	120	0.07	10	5	99.25
4	180	0.03	15	5	89.87
5	180	0.05	10	4	99.52
6	180	0.07	5	6	98.54
7	240	0.03	10	6	94.80
8	240	0.05	5	5	99.0
9	240	0.07	15	4	99.37
K_1	283.57	283.33	296.20	297.22	
K_2	287.93	284.18	293.57	288.12	
K_3	293.17	297.16	274.90	297.00	
k_1	94.52	94.43	98.73	99.18	
k_2	95.98	94.72	97.86	96.04	
k_3	97.72	99.05	91.63	93.00	
R	3.20	4.62	7.10	6.18	

由表4可知,废水初始质量浓度对磷的去除率影响最大,pH、Ce-Zn复合吸附剂投加量次之,时间影响最小;最佳工艺条件:初始质量浓度为5 mg/L、pH为4、Ce-Zn复合吸附剂投加量为0.07 g,时间为240 min。

2.6 最佳工艺条件稳定性验证

重复5次实验验证最佳工艺条件的稳定性,结果如表5所示。

由表5可知,磷去除率均值可达99.56%,相对标准偏差为0.95%,证明此工艺条件较为稳定。

表5 最佳条件重复实验

序号	磷去除率/%	平均值/%	相对标准偏差/%
1	99.24	99.56	0.95
2	99.70		
3	99.66		
4	99.76		
5	99.44		

2.7 不同吸附剂除磷性能比较

控制相同的实验条件即废水初始质量浓度为 10 mg/L, pH 为 6, Ce-Zn 复合吸附剂投加量为 0.05 g, 时间为 4 h, 温度为 25 °C, 转速为 175 r/min, 比较单一吸附剂和复合吸附剂的除磷效果, 结果如图 10 所示。

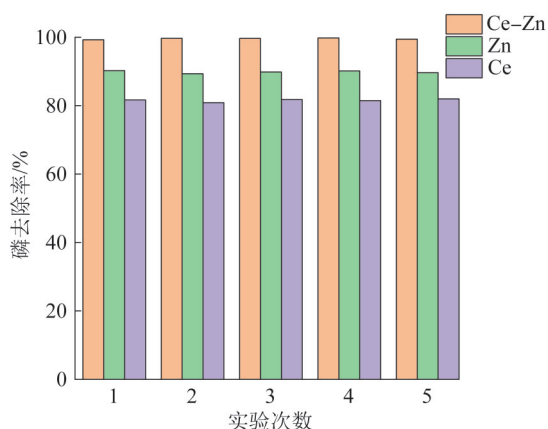


图10 不同吸附剂除磷性能比较

Fig. 10 Comparison of phosphorus removal performance of different adsorbents

由图 10 可知, Ce-Zn 复合吸附剂的除磷效果最好, 5 次实验对磷的去除率平均值为 99.56%, 可使 10 mg/L 的含磷废水质量浓度降低至 0.044 mg/L, 从而达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准的排放要求; Zn 单一吸附剂除磷效果次之, 5 次实验去除率平均值为 89.83%; Ce 单一吸附剂除磷效果最差, 5 次实验对磷的去除率平均值只有 81.54%, 说明复合吸附剂对磷的吸附性能更加优良。

2.8 Ce-Zn 复合吸附剂的再生性能研究

用 0.5 mol/L 的氢氧化钠溶液做再生剂, 在 25 °C, 175 r/min 的摇床中振荡 4 h, 洗涤干燥后进行吸附实验, 再生效果如图 11 所示。

由图 11 可知, 每次脱附再生后复合吸附剂对磷的去除率均有所降低, 但经过 3 次循环脱附再生后, 对磷的去除率保持在 90% 以上, 说明通过氢氧化钠

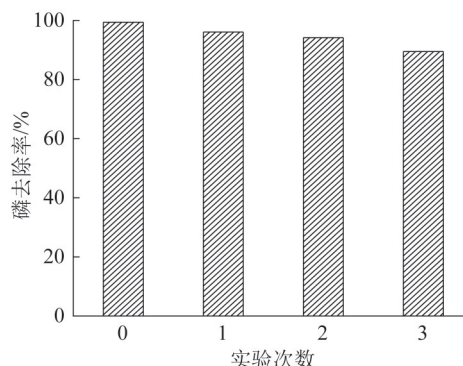


图11 Ce-Zn 复合吸附剂的再生效果

Fig. 11 Regeneration effect of Ce-Zn composite adsorbent

溶液脱附再生后, 复合吸附剂可以多次循环利用。

3 结论

(1) 表征结果表明, Ce-Zn 复合吸附剂制备较为成功, 其表面生成了 Ce 和 Zn 的氧化物颗粒, 表面粗糙, 呈多孔结构; 磷酸盐离子取代复合吸附剂表面的金属羟基是吸附除磷的主要原因。

(2) Ce-Zn 复合吸附剂除磷效果更优, 较铈和锌的单一吸附剂对磷的去除率分别提高了 10% 和 8%, 可使 10 mg/L 的含磷废水质量浓度降低至 0.044 mg/L, 从而达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002) 一级 A 标准的排放要求。

(3) 吸附除磷反应自发进行, 为多层吸附, 吸热反应, 动力学反应级数为二级。

(4) 利用碱液对吸附剂进行 3 次循环脱附再生, 对磷的去除率保持在 90% 以上, 可实现复合吸附剂的循环利用。

参考文献

- [1] 孙华杰. 我国水污染的主要成因及防治对策[J]. 环境与发展, 2019, 31(9): 57-58.
SUN Huajie. The main causes of water pollution in China and its prevention and control measures [J]. Environment and Development, 2019, 31(9): 57-58.
- [2] LUO Dacheng, YUAN Linjiang, LIU Lun, et al. The mechanism of biological phosphorus removal under anoxic-aerobic alternation condition with starch as sole carbon source and its biochemical pathway[J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 132: 90-99.
- [3] BENAMMAR L, MENASRIA T, AYACHI A, et al. Phosphate removal using aerobic bacterial consortium and pure cultures isolated from activated sludge[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2015, 95: 237-246.
- [4] 唐志敏. 水体富营养化及常用除磷方法研究进展[J]. 江西化

- 工, 2018(5):36-38.
- TANG Zhimin. Research progress on eutrophication of water body and common phosphorus removal methods[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2018(5):36-38.
- [5] YANG Jian, WANG Su, LU Zhibo, et al. Converter slag-coal cinder columns for the removal of phosphorous and other pollutants[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168(1):331-337.
- [6] 雷岗星, 张保华. 含磷废水处理技术的研究进展[J]. 石油石化节能与减排, 2013, 3(4):37-40.
- LEI Gangxing, ZHANG Baohua. Progress of phosphorus wastewater treatment technology[J]. Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry, 2013, 3(4):37-40.
- [7] 李兵兵. 离子交换树脂的结构特点及应用[J]. 黑龙江科技信息, 2015(11):127.
- LI Bingbing. Structural characteristics and application of ion exchange resin[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(11):127.
- [8] 袁晓丽. 低品位表外磷铁矿在含磷废水中的除磷特性与机理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.
- YUAN Xiaoli. The characteristics and mechanism of phosphate removal from wastewater using low grade iron ore with phosphorus[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [9] TARAYRE C, DE CLERCQ L, CHARLIER R, et al. New perspectives for the design of sustainable bioprocesses for phosphorus recovery from waste[J]. Bioresource Technology, 2016, 206:264-274.
- [10] SHI Wenmin, FU Youwei, JIANG Wei, et al. Enhanced phosphate removal by zeolite loaded with Mg-Al-La ternary (hydr) oxides from aqueous solutions: Performance and mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 357:33-44.
- [11] GU Wei, XIE Qiang, QI Chongyang, et al. Phosphate removal using zinc ferrite synthesized through a facile solvothermal technique[J]. Powder Technology, 2016, 301:723-729.
- [12] LIU Tao, ZHENG Shourong, YANG Liyan. Magnetic zirconium-based metal-organic frameworks for selective phosphate adsorption from water[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 552:134-141.
- [13] WANG Li, WANG Jingyi, HE Chi, et al. Development of rare earth element doped magnetic biochars with enhanced phosphate adsorption performance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 561:236-243.
- [14] 吴秋月. 钵锰复合氧化物吸附剂的制备及去除水中砷、磷的研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2015.
- WU Qiuyue. Preparation of Ce-Mn binary oxides adsorbent for arsenic and phosphate removal from aqueous solution[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015.
- [15] GUO Huichao, LI Wenjun, WANG Huanying, et al. A study of phosphate adsorption by different temperature treated hydrous cerium oxides[J]. Rare Metals, 2011, 30(1):58-62.
- [16] 魏婷, 牛丽君, 张光明, 等. 三元复合吸附剂 Ce-Zr-Zn 对水中低浓度磷的吸附性能及其机理[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11):2938-2945.
- WEI Ting, NIU Lijun, ZHANG Guangming, et al. Performance and mechanism of adsorption of low concentration phosphate in water by Ce-Zr-Zn ternary composite adsorbent[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11):2938-2945.
- [17] WANG Li, WANG Jingyi, HE Chi, et al. Development of rare earth element doped magnetic biochars with enhanced phosphate adsorption performance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 561:236-243.
- [18] FU Haoyang, YANG Yixuan, ZHU Runliang, et al. Superior adsorption of phosphate by ferrihydrite-coated and lanthanum-decorated magnetite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 530:704-713.
- [19] 李海宁, 陈静, 李秋梅, 等. 铁锰复合氧化物包覆海砂的吸附除磷研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3):880-886.
- LI Haining, CHEN Jing, LI Qiumei, et al. Adsorptive removal of phosphate from water using Fe-Mn binary oxide coated sea sand[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(3):880-886.
- [20] HUANG Lihui, KONG Jiaojiao, WANG Weiliang, et al. Study on Fe(III) and Mn(II) modified activated carbons derived from *Zizania latifolia* to removal basic fuchsin[J]. Desalination, 2012, 286:268-276.
- [21] ZHAO Shan, HUANG Guohe, MU Sen, et al. Immobilization of phenanthrene onto gemini surfactant modified sepiolite at solid/aqueous interface: Equilibrium, thermodynamic and kinetic studies[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598:619-627.
- [22] LIANG Xuefeng, HAN Jun, XU Yingming, et al. Sorption of Cd²⁺ on mercapto and amino functionalized palygorskite[J]. Applied Surface Science, 2014, 322:194-201.
- [23] 王信, 马啸宙, 周雯, 等. 给水污泥负载 Fe 化合物除磷行为效果及机理[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10):5420-5428.
- WANG Xin, MA Xiaozhou, ZHOU Wen, et al. Water supply sludge loaded iron compound on behavioral effect and functional mechanism of phosphorus removal[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(10):5420-5428.
- [24] 马啸宙. 铁优化给水污泥降解水中磷行为特性及机理探讨[D]. 兰州:兰州交通大学, 2016.
- MA Xiaozhou. Study of mechanism and behavioral characteristic with water plant sludge optimized by iron to remove phosphorus[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2016.
- [25] YUAN Xiaoli, BAI Chenguang, XIA Wentang, et al. Acid-base properties and surface complexation modeling of phosphate anion adsorption by wasted low grade iron ore with high phosphorus[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2014, 428:208-213.

[作者简介] 李秀玲(1983—), 硕士, 副研究员。电话:15977858879, E-mail:lixiliuling0606@163.com。通讯作者:韦岩松, 硕士, 教授。电话:13607786565, E-mail:weiyans@126.com。

[收稿日期] 2023-03-10(修改稿)