

柴胡药渣对锌离子的吸附动力学特性

代群威^{1,3}, 王岩¹, 赵玉连¹, 周世平¹, 杨兴旺², 张伟¹

1. 西南科技大学环境与资源学院; 固体废物处理与资源化省部共建教育部重点实验室, 绵阳 621010

2. 四川德培源中药科技开发有限公司, 绵阳 621000

3. 西南科技大学环境与资源学院; 四川省环境工程自控技术重点实验室, 绵阳 621010

摘要 为了探讨柴胡药渣对含锌废水的吸附特性和液相 pH 值、电导率变化特性, 以柴胡药渣为生物吸附剂, 进行了 Zn^{2+} 批量吸附实验研究。分析了液相 pH 值、 Zn^{2+} 初始浓度 (C_0)、柴胡药渣加入质量浓度 (ρ_m)、粒度 (M_z) 等因素对吸附效果的影响, 并进行等温吸附模拟及吸附动力学相关分析。结果表明, 实验室环境下的最佳的吸附条件为: pH 值为 4.0~6.0, ρ_m 为 4.0~8.0 g/L, M_z 为 40~100 目, C_0 为 0.1~2.0 mmol/L。柴胡药渣对 Zn^{2+} 的等温吸附结果很好符合了 Langmuir 和 Freundlich 吸附模型, R^2 分别为 0.978 和 0.989; 计算所得最大吸附量 ($q_{\max}$) 达到 19.96 mg/g, 说明柴胡药渣对 Zn^{2+} 有很好的吸附能力。动力学吸附分析表明, 柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附是一个快速进行的反应过程, 二级吸附速率方程拟合结果中 R^2 均在 0.997 以上, 由此认为其吸附反应过程中限速步骤是化学吸附过程。柴胡药渣对 Zn^{2+} 吸附过程中液相 pH 值分析表明, pH 值呈现初始阶段迅速升高后进入缓慢变化的趋势。

关键词 柴胡药渣; 锌离子; 生物吸附; 动力学

中图分类号 X703

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.21.002

Biosorption Kinetics Characteristics of Bupleurum Dreg to Zinc Ions

DAI Qunwei^{1,3}, WANG Yan¹, ZHAO Yulian¹, ZHOU Shiping¹, YANG Xingwang², ZHANG Wei¹

1. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education; School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

2. Depeiyuan Chinese Traditional Medicine Science and Technology Development Co., Ltd., Mianyang 621000, China

3. Key Laboratory of Sichuan Province Auto Control Technology of Environment Engineering; Southwest University of Science and Technology School of Environment and Resource, Mianyang 621010, China

Abstract In order to explore the adsorption characteristics, liquid pH, and electrical conductivity variation characteristics of bupleurum dreg to the waste water containing zinc, the bupleurum dreg was utilized as biosorbent to remove Zn^{2+} with batch experiments. The effect factors on biosorption were analyzed, which included pH values, initial Zn^{2+} concentration (C_0), biosorbent concentration (ρ_m), and mesh size (M_z). Meanwhile, the isotherm biosorption and kinetics was analyzed. The results showed that the optimum condition for biosorption was as follows: pH was 4.5~6.0, ρ_m was 4.0~8.0 g/L, C_0 was 0.1~2.0 mmol/L, M_z was 40~100 mesh. The isotherm adsorption curve of Zn^{2+} on bupleurum dreg accorded well with Langmuir and Freundlich model, and the R^2 value was 0.978 and 0.989 while the value of $q_{\max}$ was 19.96 mg/g. This shows that a bupleurum dreg has excellent adsorption capacity to zinc ions. The kinetics analysis showed that the biosorption of Zn^{2+} on bupleurum dreg was a rapid process, and the R^2 values were all above 0.997. These indicated that its limit step was chemical adsorption process. The variation trend of pH values in liquid was increasing rapidly at initial adsorption phase and then changed slowly in the succedent phases.

Keywords bupleurum dreg; zinc ions; biosorption; kinetics

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2014-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41102212); 西南科技大学自然科学基金项目 (12zx7121)

作者简介: 代群威, 副教授, 研究方向为环境友好材料, 电子邮箱: qw_dai@163.com

引用格式: 代群威, 王岩, 赵玉连, 等. 柴胡药渣对锌离子的吸附动力学特性[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 21-25.

中国正面临严重的重金属污染问题,有效处理重金属废水,突破传统处理方法的瓶颈是当前亟待解决的关键问题。生物吸附作为一种具有低成本、高效、易回收、环境友好等特点的新技术,近年来发展迅速,成为该领域研究热点,并有望弥补传统工业废水处理技术不足^[1]。为寻求合适的生物吸附剂,探讨较多的有酵母菌、藻类、细菌等微生物吸附剂^[2-6],也有植物茎叶、农林业废弃物等植物类吸附剂,并取得一定成效^[7-9],而有关中药渣作为重金属吸附剂的报道比较少见^[10]。柴胡属于灌木,根部木质化,多孔。柴胡根中主要成分为柴胡皂苷,其次含有植物甾醇、少量挥发油等药物成分。柴胡具有抗炎、保肝、解热、镇痛等功效^[11]。工业提取有效药物成分后,会留下大量药物残渣。有关柴胡药渣的处理研究较少,未见其作为重金属吸附剂的相关报道。

本文将柴胡药渣用来吸附重金属离子,通过批量实验探讨柴胡药渣对含锌废水的吸附特性和液相pH值、电导率变化特性,旨在探讨柴胡药渣型生物吸附剂处理含重金属污水的应用可行性,并为其他类型中药渣的合理、高效利用提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

柴胡药渣为经CO₂超临界萃取药物成分的剩余物,由四川德培源中药科技开发有限公司提供;ZnCl₂为分析纯试剂,由天津市科密欧化学试剂有限公司提供。

原子吸收光谱仪(AAS, AA700型, PE公司, 美国), 离心机(TGL-16C型, 上海安亭试剂厂), pH电导率仪(S40型, 梅特勒-托利多公司, 瑞士)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品准备

将柴胡药渣在60℃下干燥24 h, 取出后过筛, 筛网孔径依次为5、20、40、60、80、100、200目, 将筛分后的柴胡药渣分装, 置于干燥皿中保存。

1.2.2 吸附性能分析

称取一定量ZnCl₂溶解于去离子水, 配制成10.0 mmol/L的Zn²⁺储备液1000 mL。在实验室批量实验时, 取Zn²⁺储备液稀释至实验所需浓度, 分别取100 mL加入250 mL锥形瓶中, 并加入一定量的柴胡药渣, 以120 r/min振荡后计时。每次取样1.0 mL, 取出后立即在4000 r/min下离心8 min, 取上清液稀释后按1%体积比加入浓硝酸(质量分数65.00%~68.00%)后, 置于4℃条件下保存为AAS试样, 待测。

所取实验条件变化范围如下: pH值为2.5~7.0, Zn²⁺初始浓度(C₀)为0.1~5.0 mmol/L, 柴胡药渣加入质量浓度(ρ_m)为0.5~15.0 g/L, 粒度(M_r)为5~200目。分别在吸附30、90 min时取样。

1.2.3 吸附动力学分析

动力学实验过程中, 在T=30℃, M_r=200目, C₀分别为0.5、1.0和2.0 mmol/L的初始条件下进行实验, 吸附反应开始后分

别在5、10、15、20、30、60、90、120、180、240、360、480、1440 min时取样, 每次1.0 mL, 取出后离心制备AAS试样, 待测。

柴胡药渣对Zn²⁺的吸附动力学过程, 可以用准二级反应动力学模型描述, 线性相关性强于一级速率方程。

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (1)$$

式中, k₂为速率常数, g/(mg·min); q_e为平衡吸附量, mg/g; q_t为t时刻吸附量, mg/g; t为时间, min。

设h=k₂q_e², 则由式(2)可得:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{h} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

式中, h为吸附初始速率, mg/(g·min)。

2 结果与讨论

2.1 pH值对吸附效果的影响

pH值作为影响生物吸附性能的重要因素, 不仅影响液相中Zn²⁺的溶解特性, 也影响柴胡药渣吸附剂表面荷电性及吸附点位的数量, 从而决定着液相中Zn²⁺与柴胡药渣吸附基团间络合、水解等相互作用的情况。实验选取的pH值范围为2.5~7.0(T=30℃, ρ_m=5.0 g/L, C₀=1.0 mmol/L), 结果如图1。从图1可以看出, pH值为4.0~7.0时柴胡药渣对Zn²⁺具有相对较好的吸附效果, 此范围内柴胡药渣的吸附效率变化不大; 由于在pH值较高情况下会形成Zn(OH)₂, 影响实验结果的准确性, 因此实验确定较佳的pH值范围为4.0~6.0。其中, 在吸附进行至30 min时, pH=4.5下柴胡药渣对Zn²⁺具有明显的吸附优势。随着pH值的降低, 液相中H⁺更多参与柴胡药渣表面活性吸附点位的竞争, 在一定程度上可将部分已吸附的Zn²⁺重新交换进入液相, 使柴胡药渣对Zn²⁺的整体吸附效果降低。

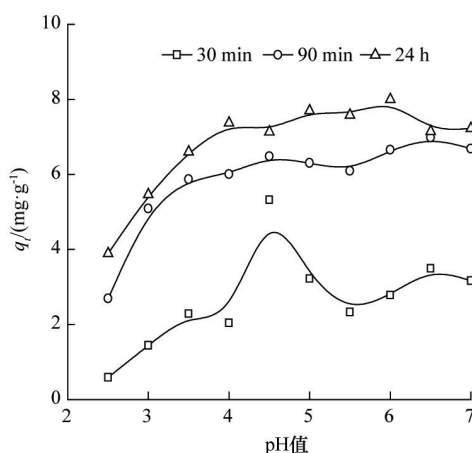


图1 pH值对柴胡药渣吸附Zn²⁺的影响

Fig. 1 Biosorption of Zn²⁺ on bupleurum dreg at different pH

2.2 ρ_m对吸附效果的影响

图2为在pH为5.0、T为30℃、C₀为1.0 mmol/L的条件下, 分别在30、90、1440 min时, ρ_m在0.5~15.0 g/L范围内变化情况

下柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附效果曲线。在3个取样点柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附效率(n)范围分别为8.30%~34.50%、16.20%~78.80%和21.70%~86.20%,柴胡药渣单位吸附量 q_t 分别为8.60~1.20 mg/g、16.70~2.70 mg/g和22.40~3.00 mg/g。可见,随着柴胡药渣加入量的增加,单位体积溶液中存在的能够吸附 Zn^{2+} 的活性点位增多,对溶液中 Zn^{2+} 的吸附效率随之提高;然而吸附点位的增多也使单位吸附剂“捕获” Zn^{2+} 的量减少,造成 q_t 降低。柴胡药渣较佳的加入质量浓度范围为4.0~8.0 g/L。

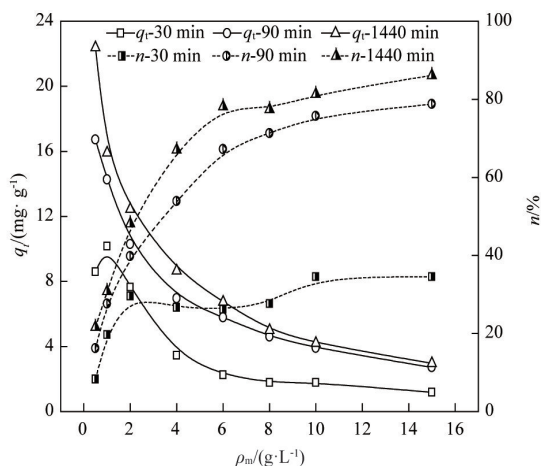


图2 不同 ρ_m 对柴胡药渣吸附 Zn^{2+} 的影响

Fig. 2 Biosorption of Zn^{2+} on bupleurum dreg at different ρ_m

2.3 柴胡药渣粒度对吸附效果的影响

图3为不同粒径范围内的柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附对比结果。可以看出,粒径为80目的柴胡药渣具有最好的吸附效果,30 min时的吸附效率已达到77.10%。相比之下,200目实验组的吸附效率只有55.28%,其吸附效率只相当于80目实验组的2/3左右。效率最低的是5目实验组,其吸附效率只有18.16%。40~80目粒径范围内,柴胡药渣在30 min时对初始浓度为1.0 mmol/L的 Zn^{2+} 吸附已经达到70%以上,粒径为100目时,吸附效率也达到了66.75%。表明在实验条件下, M_z 为40~100目为最佳的吸附粒径范围。

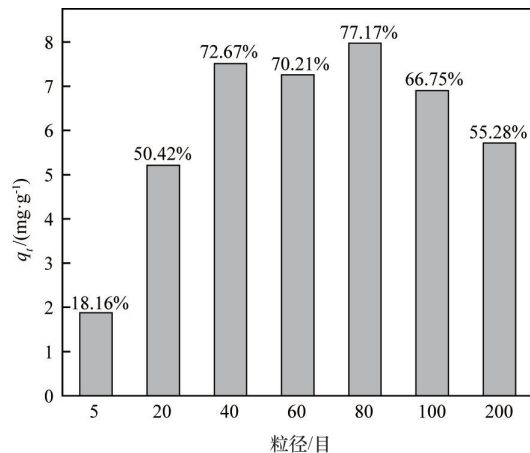


图3 不同粒径对柴胡药渣吸附 Zn^{2+} 的影响

Fig. 3 Biosorption of Zn^{2+} on bupleurum dreg at different M_z

2.4 C_0 对吸附效果的影响及等温吸附模型分析

C_0 决定着液相中能够参与点位竞争的目标 Zn^{2+} 总量,在 ρ_m 等其他实验条件一定的情况下,随 C_0 的增加,液相中单位活性点位上参与竞争的 Zn^{2+} 数量提高,活性点位的有效占据概率随之增加。实验过程中,分别调节 C_0 为0.1、0.25、0.5、1.0、2.0、3.0、4.0和5.0 mmol/L,分析柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附效果,结果如图4所示。由图4可以看出,柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附效果基本表现出了 q_t 随 C_0 提高而增大,相反吸附效率随着 C_0 增加而降低的趋势。在实验所选 Zn^{2+} 的初始浓度范围内,柴胡在30、90、1440 min时的 q_t 分别为0.36~11.12、0.78~16.47、0.90~13.00 mg/g。当 $C_0=0.1$ mmol/L时,液相含有 Zn^{2+} 的初始浓度相对较低,柴胡药渣拥有的吸附点位相对充裕,当吸附进行至30 min时,其吸附效率只有34.73%,低于相同时间内 C_0 为0.25~2.0 mmol/L的其他各实验组。在该浓度下,吸附进行至90、1440 min时,对应吸附效率分别达到76.74%和88.53%,高于其他各实验组对应吸附效率。这表明液相中 Zn^{2+} 浓度会影响其进入吸附点位的速率。在较低 Zn^{2+} 浓度下,活性点位对 Zn^{2+} 的吸附与解吸(液相中 H^+ 与 Zn^{2+} 的交换再溶出过程)间达到相对平衡所需时间较长。 C_0 为1.0、2.0 mmol/L时,吸附进行至1440 min时,对应吸附效率分别为69%和56%,继续增加 C_0 ,吸附效率将低于50%,当 C_0 为5.0 mmol/L时,吸附效率降到25.00%以下。当 C_0 为0.1~0.5 mmol/L时,吸附效率均在85.00%以上。整体来讲,柴胡药渣在 C_0 为0.1~2.0 mmol/L初始浓度范围内相对有较好的吸附效果。

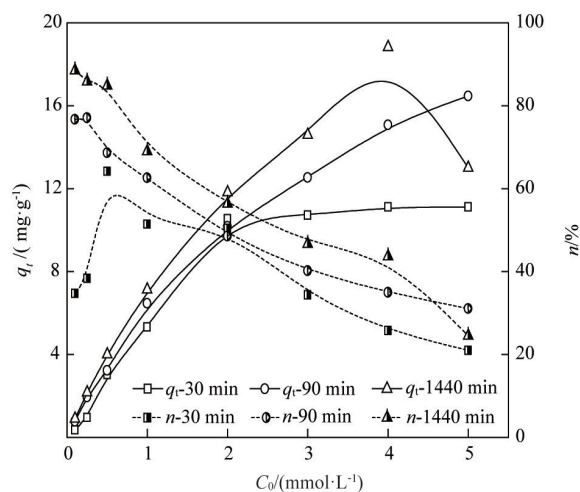


图4 不同 C_0 对柴胡药渣吸附 Zn^{2+} 的影响

Fig. 4 Biosorption of Zn^{2+} on bupleurum dreg at different C_0

Langmuir模型是常用的描述吸附体系中金属离子吸附量与溶液中金属离子平衡质量浓度之间关系的模型。对柴胡药渣吸附 Sr^{2+} 进行Langmuir和Freundlich等温吸附模型拟合,经计算得Langmuir方程为 $y = 0.9983 + 0.0501x$; Freundlich方程为 $y = 0.4224 + 0.5342x$,两种模型的对应 R^2 分别为0.978和0.989。由Langmuir模拟拟合计算所得 q_{max} 达到了19.96 mg/g,约0.31 mmol/g。

刘世亮等^[12]利用不同秸秆含量的土壤作为吸附剂对 Zn^{2+} 进行吸附, Zn^{2+} 的最大吸附量为0.42 mg/g。龙新宪等^[13]利用黄松土、粉泥土、江涂砂3种土壤作为吸附剂对 Zn^{2+} 进行吸附, Zn^{2+} 的最大吸附量分别为1.18、0.67、0.59 mg/g,柴胡药渣相比以上土壤吸附剂对 Zn^{2+} 的最大吸附量较高,说明柴胡药渣对 Zn^{2+} 有很好的吸附能力。周洪英等^[14]等利用海带、裙带菜2种褐藻作为生物吸附剂对 Zn^{2+} 进行吸附, Zn^{2+} 的最大吸附量分别为49.38、55.01 mg/g,以上2种吸附剂对 Zn^{2+} 的最大吸附量高于柴胡药渣,但柴胡药渣属于药物残渣,较其他吸附剂更容易获得,且更经济实用。

2.5 吸附动力学及准二级反应动力学模型拟合分析

对不同 C_0 下柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附动力学进行分析发现(图5),柴胡药渣在 C_0 分别为0.5、1.0、2.0 mmol/L的条件下,均呈现快速吸附过程。在3个不同初始浓度条件下,在吸附进行5 min时,3个初始浓度条件下,吸附效率相似,均达到40%以上;而对应 q_t 分别为2.06、4.16、8.42 mg/g,基本呈现与初始浓度一致的倍数关系。可见在吸附初始阶段,柴胡药渣表面能与 Zn^{2+} 作用的点位相对充足,液相中 Zn^{2+} 进入活性点位的速率相当,进入活性点位的 Zn^{2+} 总量与其初始浓度呈现比例关系,这种比例关系随着吸附反应进行呈现逐渐减弱趋势。如在60 min时,其吸附基本达到初步平衡, q_t 分别为3.43、6.66、11.30 mg/g,对应吸附效率 n 分别为72.87%、64.40%、53.88%。吸附进行到1440 min时已基本达到充分平衡,此时 n 为86.26%、69.01%、56.40%,对应 q_t 则分别为4.07、7.13、11.83 mg/g。

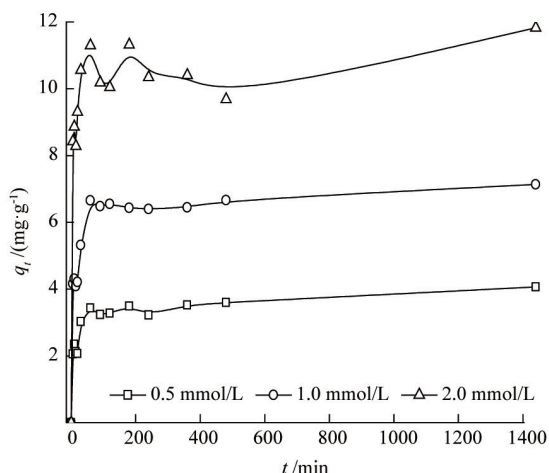


图5 不同 C_0 下柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附动力学分析

Fig. 5 Biosorption kinetics analysis of bupleurum dreg to Zn^{2+} at different C_0

由图5和表2可以看出,不同初始浓度条件下柴胡药渣对 Zn^{2+} 的动力学二级吸附速率方程拟合结果中 R^2 均在0.997以上,拟合程度较好。方程拟合计算得到,当 R_0 为0.5、1.0、2.0 mmol/L时的平衡吸附量 q_e 分别为4.06、7.14、11.68 mg/g,对应最大吸附效率分别为85.00%、70.00%、54.00%,对应条件

下1440 min时的 q_t 分别为4.07、7.13、11.83 mg/g,二者一致性非常好。说明1440 min时,柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附已经达到充分的吸附平衡。速率常数 k_2 在 C_0 为0.5、1.0 mmol/L时,高于 C_0 为2.0 mmol/L时对应的 k_2 ,也说明了前者初始条件下,柴胡药渣对 Zn^{2+} 具有更好的吸附速率,能更快地达到吸附平衡。柴胡药渣对 Zn^{2+} 的实际吸附动力学过程中,在 C_0 为0.5、1.0 mmol/L条件下,吸附均在60 min时达到基本平衡,而 C_0 为2.0 mmol/L条件下,吸附在180 min左右达到基本平衡。

表2 不同 C_0 下柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附的准二级反应动力学模型拟合参数

Table 2 Parameters of second kinetics biosorption model of bupleurum dregs to Zn^{2+}

C_0 (mmol·L ⁻¹)	a	b	R^2	h	k_2	q_e (mg·g ⁻¹)
0.5	6.210	0.246	0.999	0.161	0.0097	4.06
1.0	2.057	0.140	1.000	0.486	0.0095	7.14
2.0	1.429	0.086	0.997	0.700	0.0051	11.68

2.6 柴胡药渣吸附 Zn^{2+} 过程中液相pH值变化特性

柴胡药渣初加入后使得液相pH值增高,在pH值为4.5的无 Zn^{2+} 对照组中按 ρ_m 为5.0 g/L加入柴胡药渣,其液相pH值最大可达到5.8;而相应 C_0 为0.5 mmol/L和 C_0 为1.0 mmol/L实验组液相最大pH值分别为5.3和5.1(图6)。吸附过程中,2个浓度对应实验组之间的pH差值(ΔpH)逐渐增大,可能是由于 C_0 为1.0 mmol/L实验组液相中柴胡药渣对 Zn^{2+} 的单位吸附量 q_t 相对 C_0 为0.5 mmol/L的 q_t 大。也就是说,液相中进入吸附点位的 Zn^{2+} 较多,液相pH值变化相对较大。例如,30 min时,2个实验浓度下 q_t 分别为7.13和4.07 mg/g。

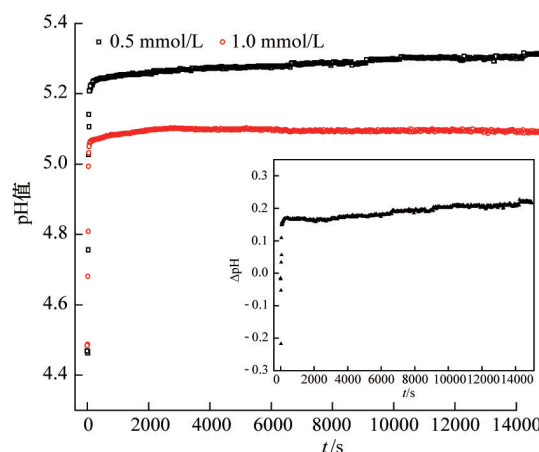


图6 柴胡药渣吸附 Zn^{2+} 过程中液相pH变化特性

Fig. 6 Liquid pH variation characteristic of bupleurum dreg to Zn^{2+}

3 结论

1) 批量实验表明,柴胡药渣对 Zn^{2+} 的较佳的吸附参数范围为:pH 值为 4.0~6.0, ρ_m 为 4.0~8.0 g/L,粒度为 40~100 目, C_0 为 0.1~2.0 mmol/L。

2) 实验条件下,柴胡药渣对 Zn^{2+} 的吸附是一个快速进行的反应过程,不同初始浓度下柴胡药渣对 Zn^{2+} 的动力学二级吸附速率方程拟合结果中 R^2 均在 0.997 以上,拟合程度非常好,由此认为其吸附反应过程中限速步骤是化学吸附过程。

3) 柴胡药渣对 Zn^{2+} 的等温吸附模拟分析表明:柴胡药渣对 Zn^{2+} 的拟合结果符合 Langmuir 和 Freundlich 吸附模型,对应 R^2 分别为 0.978 和 0.989;且由 Langmuir 模拟拟合计算所得 q_{max} 达到了 19.96 mg/g,说明柴胡药渣对 Zn^{2+} 有很好的吸附能力。

4) 柴胡药渣对 Zn^{2+} 吸附过程中液相 pH 值分析表明,由于柴胡药渣的加入,液相 pH 值在吸附初期阶段迅速升高后呈现缓慢变化过程,且 C_0 为 0.5、1.0 mmol/L 两实验组间的 ΔpH 表现出逐渐增大的趋势。

5) 柴胡药渣是工业提取有效药物成分后,留下大量药物残渣,利用柴胡药渣对 Zn^{2+} 进行吸附,经济实用,具有可行性,并为其他类型中药渣的合理、高效利用提供新思路。

参考文献(Reference)

- [1] Gupta V K, Rastogi A. Biosorption of lead from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species: Kinetics and equilibrium studies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 152(1): 407-414.
- [2] 代群威, 董发勤, Noonan M J, 等. 面包酵母菌在铅铜模拟废水中的吸附动力学[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(4): 788-794.
Dai Qunwei, Dong Faqin, Noonan M J, et al. Biosorption kinetics of baker's yeast in lead and copper waste water[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(4): 788-794.
- [3] Dursun A Y. A comparative study on determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of biosorption of copper (II) and lead (II) ions onto pretreated *Aspergillus niger*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, 28(2): 187-195.
- [4] Zhang Y, Banks C. The interaction between Cu, Pb, Zn and Ni in their biosorption onto polyurethane-immobilised *Sphagnum moss*[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2005, 80(11): 1297-1305.
- [5] Goksungur Y, Uren S, Guvenc U. Biosorption of cadmium and lead ions by ethanol treated waste Baker's yeast biomass[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(1): 103-109.
- [6] 代淑娟, 魏德洲, 白丽梅, 等. 生物吸附-沉降法去除电镀废水中镉[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(10): 1945-1950.
Dai Shujuan, Wei Dezhou, Bai Limei, et al. Removing cadmium from cadmium-containing electroplating wastewater by biosorption-sedimentation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, 18(10): 1945-1950.
- [7] 袁江红, 全学军, 冉秀芝, 等. 油茶饼粕生物吸附剂对 Ni^{2+} 的吸附性能[J]. 化工学报, 2011, 62(4): 986-993.
Yuan Hongjiang, Quan Xuejun, Ran Xiuzhi, et al. Adsorption performance of Camellia cakes as bioadsorbent for removal of Ni^{2+} [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(4): 986-993.
- [8] 马海虎, 戴灵鹏, 冯燕宁, 等. 满江红干体对锌离子的生物吸附[J]. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1175-1179.
Ma Haihu, Dai Lingpeng, Feng Yanning, et al. Biosorption of Zn(II) by dried *Azolla imbricata* biomass[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 3(7): 1175-1179.
- [9] Li J, Chen E Z, SU H J. Biosorption of Pb^{2+} with modified soybean hulls as absorbent[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, 19(2): 334-339.
- [10] 韦平英, 魏东林, 莫德清. 板蓝根药渣对低浓度含铅废水的吸附特性研究[J]. 离子交换与吸附, 2003, 19(4): 351-356.
Wei Pingying, Wei Donglin, Mo Deqing. Biosorption of lead by *Isatis Indigotica* fort draff [J]. Ion Exchange and Adsorption, 2003, 19(4): 351-356.
- [11] 谢东浩, 蔡宝昌, 安益强, 等. 柴胡皂苷类化学成分及药理作用研究进展[J]. 南京中医药大学学报, 2007, 23(1): 63-65.
Xie Donghao, Cai Baochang, An Yiqiang, et al. Advances in chemical components and pharmacology of *Bupleurum Saikosaponin*[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2007, 23(1): 63-65.
- [12] 黄德乾, 王玉军, 汪鹏, 等. 三种不同类型土壤上水稻对 Cu、Pb 和 Cd 单一及复合污染的响应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 46-49.
Huang Deqian, Wang Yujun, Wang Peng, et al. Response of rice in three types of soils to Cu, Pb and Cd with single and combined pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(1): 46-49.
- [13] 龙新宪, 倪吾钟, 杨肖娥. 菜园土壤锌的吸附-解吸特性研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 51-53.
Long Xinxian, Nin Wuzhong, Yang Xiaoe. Studies on the zinc adsorption-desorption characteristics of vegetable garden soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(1): 51-53.
- [14] 周洪英, 贾海红, 李娜. 两种褐藻对水溶液中 Zn^{2+} 的吸附研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(1): 150-154.
Zhou Hongying, Jia Haihong, Li Na. Study on the biosorption of Zn^{2+} by two brown algae[J]. Food Research and Development, 2012, 33(1): 150-154.

(编辑 田恬)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。