

二次回归正交旋转组合优化麦麸渣吸附铅离子(Pb^{2+})

陈 莉

(运城学院生命科学系, 山西 运城 044000)

摘 要: 采用二次回归正交旋转组合设计方法对麦麸渣吸附 Pb^{2+} 条件进行优化, 建立pH值(X_1)、温度(X_2)、时间(X_3)、质量浓度(X_4)、加入量(X_5)5个因素与吸附率 Y 的回归模型。在pH8、温度100℃、时间1h、 Pb^{2+} 质量浓度20mg/L、加入量1.6g/100mL条件下, 麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附率最高可达98.91%。麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附以单分子层的物理吸附为主, Freundlich吸附等温式能较好地描述其吸附热力学情况; 麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附先是快速吸附, 吸附时间超过60min后为慢速吸附; 麦麸渣对低质量浓度 Pb^{2+} 溶液的吸附效果好于活性炭。

关键词: 麦麸渣; 铅离子; 生物吸附; 优化; 二次回归正交旋转组合设计; 吸附等温线; 吸附动力曲线

Quadratic Rotation-Orthogonal Composite Experimental Design for the Optimization of Experimental Conditions for Pb^{2+} Adsorption by Wheat Bran Dietary Fiber

CHEN Li

(Department of Life Science, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China)

Abstract: Experimental conditions for the adsorption of Pb^{2+} by wheat bran dietary fiber (WBDF) were optimized using a quadratic rotation-orthogonal composite experimental design. A regression model for adsorption rate (Y) as function of five independent variables including pH (X_1), temperature (X_2), time (X_3), Pb^{2+} concentration (X_4), and adsorbent dose (X_5) was established. Maximum adsorption rate (98.91%) was obtained when 1.6 g/100 mL of WBDF was added to 20 mg/L Pb^{2+} solution (pH 8) and hold at 100 °C for 1 h. Single molecule layer absorption was dominant during the adsorption process. The adsorption thermodynamics of Pb^{2+} could be well described using Freundlich isotherm equation. Moreover, the adsorption process was fast in the first 60 min and then slowed down. WBDF had better adsorption efficiency for Pb^{2+} at low concentrations than activated carbon.

Key words: wheat bran dietary fiber (WBDF); Pb^{2+} ; bio-adsorption; optimization; quadratic rotation-orthogonal composite experimental design; adsorption isotherm; dynamic adsorption curve

中图分类号: TQ028.15; TQ340.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2013)02-0099-06

重金属污染尤其是水体重金属污染是一个极其重要的环境保护问题。水体中重金属通过累积和生物富集作用, 对水体及水生生物产生不良影响^[1-2]。重金属在水生生物体内累积到一定数量, 会出现生长发育停滞或受阻, 甚至会导致个体死亡及整个水生生态系统崩溃^[3]。因此各国广泛开展修复治理水体重金属污染的研究, 传统方法如化学沉淀法、氧化还原法、离子交换法、电解法、膜过滤法, 通常价格昂贵, 并且由于有害副产品的存在, 使其具有潜在的危害性^[4]。二次正交旋转组合设计与传统的单因子试验和正交试验法相比, 具有处理单元数少, 数据含有信息量大, 统计分析性质好, 回归方程精度高等优点。基本保留了回归正交设计试验次数少、计算简便以及部分消除回归系数之间的相关性等特点, 能根据测值直接寻求最优区域, 可从多角度对模型进行模拟分析^[5]。

收稿日期: 2011-10-25

基金项目: 运城学院院级项目(CY-2012001)

作者简介: 陈莉(1980—), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为生物技术与生态环境。E-mail: clssshine@yahoo.com.cn

本实验拟采用静置吸附法, 以麦麸渣为生物吸附剂, 应用二次回归正交旋转组合设计对 Pb^{2+} 吸附率进行系统研究, 以优化 Pb^{2+} 吸附条件, 为麦麸渣资源的应用提供理论基础, 为开拓绿色环保工艺提供参数。该项研究对对废弃物资源化, 再利用来治废, 实现经济循环发展和保护环境有积极意义, 具有广阔应用前景。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

麦麸 山西运城禹都面粉厂; 蒸馏水自制; 硝酸铅、氢氧化钠、盐酸均为分析纯。

ASF-3000型原子吸收光谱仪 北京科创海光仪器有限公司。



1.2 方法

1.2.1 麦麸的制取

在前人研究^[6-7]的基础上, 设置的麦麸膳食纤维制备工艺流程为: 麦麸→取样→漂洗至中性→碱液浸泡→漂洗至中性→酸液浸泡→漂洗至中性→干燥→粉碎→粉碎过筛(目数: 0、20、40、60、80、100目)→麦麸膳食纤维。

1.2.2 标准曲线绘制

分别精密配制硝酸铅标准溶液1、2、3、4、5mg/L, 用原子吸收分光光度仪作3次平行实验, 测其吸光度, 绘制标准曲线。线性方程为 $y=0.0024x+0.0044$, $R^2=0.9940$ 。表明该标准溶液在10~100mg/L范围内呈极好的线性关系。

1.2.3 五因素二次回归正交旋转组合设计

在其他学者单因素试验设计结果^[8-10]的基础上, 对影响重金属 Pb^{2+} 吸附的关键因素进行优化, 求出多因素系统中各影响因素的最佳组合条件。

采用五因素二次回归正交旋转组合的试验设计方法, 5个关键因素分别为: pH值、温度、时间、硝酸铅溶液质量浓度、纤维素加入量。首先, 选择5因素的上下限值(Z_{ij} , Z_{2j})。计算各影响因素的零水平(Z_0)和变化间隔 Δj 并根据公式: $Z_0=(Z_{1j}+Z_{2j})/2$, $\Delta j=(Z_{1j}-Z_{2j})/\gamma$ 编制因素水平编码表, 如表1所示。

表1 因素水平编码表

Table 1 Coded values corresponding actual values of the optimization parameters used in the quadratic rotation-orthogonal composite experimental design

水平	X_1 pH	X_2 温度/℃	X_3 时间/h	X_4 质量浓度/(mg/L)	X_5 加入量/(g/100mL)
-2	2	20	1	20	0.4
-1	4	40	2	40	0.8
0	6	60	3	60	1.2
1	8	80	4	80	1.6
2	10	100	5	100	2.0

1.2.4 麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附率的测定

$$\text{吸附量 } q = (C_0 - C_1) \times V / m$$

$$\text{吸附率 } \% = (C_0 - C_1) \times 100 / C_0$$

式中: C_0 为吸附前 Pb^{2+} 的初始浓度质量浓度/(mg/L); C_1 为吸附后 Pb^{2+} 的平衡质量浓度/(mg/L); V 为 Pb^{2+} 溶液体积/L; m 为加入苜蓿叶渣质量/g^[8]。

1.2.5 数据处理

采用Excel、SAS和DPS软件对数据进行分析、处理以及图形的制作。

1.2.6 Pb^{2+} 的吸附等温线

常采用Langmuir和Freundlich等温式研究对溶液中重金属离子吸附的机理^[8]。Langmuir等温式^[11]可表示为:

$$Clq = C/q_m + 1/(q_m b) \quad (1)$$

Freundlich等温式^[12]可以表示为:

$$q = KC^n \quad (2)$$

对式(2)两边取对数即:

$$\lg q = \lg K + n \lg C \quad (3)$$

式中: C 为吸附平衡质量浓度/(mg/L); q 为吸附量/(mg/g); q_m 为饱和吸附量/(mg/g); b 为吸附平衡常数; K 和 $n(n<1)$ 为一定温度下的常数。

绘制吸附等温线的实验条件: 配制7份不同质量浓度的 Pb^{2+} 溶液各50mL, 溶液pH6, 每份加入麦麸渣1g, 在20℃和40℃条件下静置吸附5h后取上清液, 离心, 过滤, 用原子吸收光谱仪测定溶液中金属离子质量浓度, 并计算吸附量, 绘制吸附等温线。

1.2.7 Pb^{2+} 的吸附动力曲线

动力学研究有助于探讨吸附机理。本研究采用目前常用的吸附动力学模型, 即一级动力学和二级动力学吸附速率模型, 来探讨麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附机理。

一级动力学模型公式^[13]如下:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - k_1 t / 2.303 \quad (4)$$

二级动力学模型公式^[13]如下:

$$t/q_t = 1/(k_2 q_e^2) + t/q_e \quad (5)$$

式中: q_e 为吸附平衡状态的吸附量/(mg/g); q_t 为 t 时的吸附量/(mg/g); k_1 为一级吸附速率常数/ min^{-1} ; k_2 为二级吸附速率常数/($\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$)。

绘制吸附动力曲线的实验条件: 配制7份60mg/L硝酸铅溶液各50mL, 均加入麦麸渣1g, 吸附温度为40℃, 分别静置吸附20、40、60、90、120、240、480min, 之后取上清液离心, 过滤, 用原子吸收光谱仪测定溶液中金属离子浓度, 并计算吸附量, 绘制吸附速率曲线。

1.2.8 麦麸渣与活性炭吸附能力的对比

配制3种不同初始质量浓度的 Pb^{2+} 溶液(10、20、50mg/L), 每种质量浓度的溶液配2份, 每份50mL, 溶液pH6, 加入的麦麸渣与活性炭均为1g, 室温静置吸附2h, 之后取上清液, 离心, 过滤, 用原子吸收光谱仪测定金属离子质量浓度, 得到吸附率, 对麦麸渣和活性炭在3中不同初始质量浓度的 Pb^{2+} 溶液中的吸附能力做对比^[14]。

2 结果与分析

2.1 麦麸渣粒径对 Pb^{2+} 吸附效果的影响

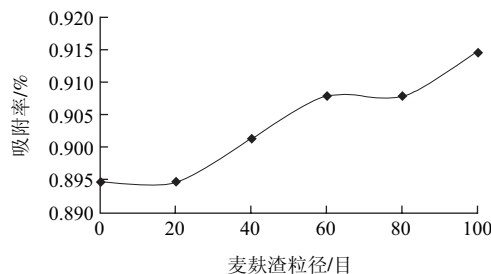


图1 麦麸渣粒径对吸附效果的影响

Fig.1 Effect of WBDF particle size on adsorption efficiency

从图1可以看出, Pb^{2+} 的吸附率随着麦麸渣粒径的减少而增大, 但是过筛100目的和不过筛的吸附率差别仅2%左右, 变化很小, 因此后续实验选取不过筛的麦麸进行研究。

2.2 回归方程的建立

表2 二次回归正交旋转组合试验设计及结果
Table 2 Experimental design and results for response surface analysis

试验号	X_1 pH	X_2 温度	X_3 时间	X_4 质量浓度	X_5 加入量	Y 吸附率/%
1	1	1	1	1	1	61.15
2	1	1	1	-1	-1	83.75
3	1	1	-1	1	-1	31.98
4	1	1	-1	-1	1	83.75
5	1	-1	1	1	-1	38.75
6	1	-1	1	-1	1	82.71
7	1	-1	-1	1	1	41.88
8	1	-1	-1	-1	-1	75.42
9	-1	1	1	1	-1	30.94
10	-1	1	1	-1	1	78.54
11	-1	1	-1	1	1	48.65
12	-1	1	-1	-1	-1	75.42
13	-1	-1	1	1	1	29.90
14	-1	-1	1	-1	-1	68.13
15	-1	-1	-1	1	-1	0.21
16	-1	-1	-1	-1	1	68.13
17	-2	0	0	0	0	16.94
18	2	0	0	0	0	81.53
19	0	-2	0	0	0	45.42
20	0	2	0	0	0	89.17
21	0	0	-2	0	0	69.72
22	0	0	2	0	0	46.67
23	0	0	0	-2	0	98.92
24	0	0	0	2	0	21.81
25	0	0	0	0	-2	16.94
26	0	0	0	0	2	73.19
27	0	0	0	0	0	68.33
28	0	0	0	0	0	64.86
29	0	0	0	0	0	69.72
30	0	0	0	0	0	61.39
31	0	0	0	0	0	60.00
32	0	0	0	0	0	72.50
33	0	0	0	0	0	72.50
34	0	0	0	0	0	70.42
35	0	0	0	0	0	69.72
36	0	0	0	0	0	69.72

采用DPS数据处理系统采用二次回归旋转组合试验统计方法进行拟合, 试验结果见表2, 建立pH值(X_1)、温度(X_2)、时间(X_3)、质量浓度(X_4)、加入量(X_5)对吸附率(Y)的数学模型回归方程为:

$$Y=67.56718+9.52691X_1+7.35677X_2+0.09693X_3-20.27575X_4+8.44184X_5-4.14591X_1^2+0.36798X_2^2-1.90632X_3^2-1.36466X_4^2-5.18757X_5^2-2.83203X_1X_2+1.13932X_1X_3+1.79036X_1X_4-0.68359X_1X_5-1.20443X_2X_3+2.18099X_2X_4+0.61849X_2X_5+1.72526X_3X_4-1.79036X_3X_5+4.32943X_4X_5$$

2.3 二次回归模型的显著性检验及重建二次回归模型

为检验回归方程的有效性, 对回归方程进行失拟性检验。由表3可知, 失拟项 $F_1=13.250>F_{0.01(6,9)}=5.80$, 说明失拟显著, 表明存在未知因素对试验结果影响, 但并不大。回归方程的显著性检验 $F_2=7.660>F_{0.01(20,15)}=3.37$, 说明回归极显著, 即试验所选择5个因素对麦麸渣吸附 Pb^{2+} 效果有显著影响。由此可知, 所得二次回归方程模型合适。

表3 二次正交旋转组合试验结果方差分析
Table 3 Analysis of variance for the fitted regression model

变异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
X_1	2178.2882	1	2178.2882	19.22431	0.00053
X_2	1298.9299	1	1298.9299	11.4636	0.00407
X_3	0.2255	1	0.2255	0.00199	0.96501
X_4	9866.5472	1	9866.5472	87.07641	0.00001
X_5	1710.352	1	1710.352	15.09457	0.00146
X_1^2	550.0331	1	550.0331	4.85427	0.04362
X_2^2	4.3332	1	4.3332	0.03824	0.84758
X_3^2	116.2901	1	116.2901	1.02631	0.32709
X_4^2	59.5931	1	59.5931	0.52593	0.47948
X_5^2	861.149	1	861.149	7.6	0.01468
X_1X_2	128.3264	1	128.3264	1.13253	0.30407
X_1X_3	20.7689	1	20.7689	0.18329	0.67464
X_1X_4	51.2865	1	51.2865	0.45262	0.51132
X_1X_5	7.4768	1	7.4768	0.06599	0.80076
X_2X_3	23.2103	1	23.2103	0.20484	0.65732
X_2X_4	76.1074	1	76.1074	0.67168	0.4253
X_2X_5	6.1205	1	6.1205	0.05402	0.81936
X_3X_4	47.6244	1	47.6244	0.42031	0.52659
X_3X_5	51.2865	1	51.2865	0.45262	0.51132
X_4X_5	299.903	1	299.903	2.64677	0.12458
回归	17357.851	20	867.8926	$F_2=7.660$	0.00003
剩余	1699.636	15	113.3091		
失拟	1526.7965	6	254.4661	$F_1=13.250$	0.00003
误差	172.8395	9	19.2044		
总和	19057.488	35			

从表3各回归系数的显著水平 P 值可以看出, pH值(X_1)、温度(X_2)、质量浓度(X_4)、加入量(X_5)对 Pb^{2+} 吸附率(Y)在 $\alpha=0.01$ 水平显著。5个因素对 Pb^{2+} 吸附率(Y)效果影响大小顺序为: 质量浓度>pH值>加入量>温度>时间。

剔除回归方程中不显著因素, 得到简化后的回归方程为:

$$Y=67.56718+9.52691X_1+7.35677X_2-20.27575X_4+8.44184X_5-4.14591X_1^2-5.18757X_5^2-2.83203X_1X_2+4.32943X_4X_5$$

麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附率与pH值、温度、时间、质量浓度、加入量的相关指数 R^2 =回归平方和/总平方和=91.08%, 而其他因素的影响和误差占8.92%。

2.4 单因素效应分析

用“降维法”将任意4个因素固定在零水平条件下, 得到另一个因素与吸附率的效应方程为:

$$Y_1 = 67.56718 + 9.52691X_1 - 4.14591X_1^2$$

$$Y_2 = 67.56718 + 7.35677X_2 + 0.36798X_2^2$$

$$Y_3 = 67.56718 + 0.09693X_3 - 1.90632X_3^2$$

$$Y_4 = 67.56718 - 20.27575X_4 - 1.36466X_4^2$$

$$Y_5 = 67.56718 + 8.44184X_5 - 5.18757X_5^2$$

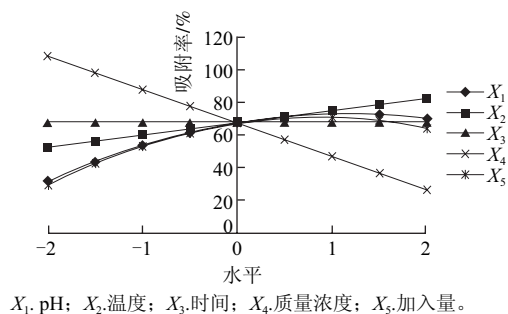


图2 各因素对 Pb^{2+} 吸附率的影响
Fig.2 Effect of varying levels of each factor on adsorption efficiency

由图2可知,在 $-2 \leq X_i \leq 2$ 的范围内,吸附率随温度增加相应提高,明显表现为正相关;吸附率随质量浓度增加呈下降趋势,明显表现为负相关;pH值、膳食纤维加入量与吸附率抛物线关系,表明两因素均存在一个合理范围,超过此范围吸附率会下降,即对麦麸渣吸附 Pb^{2+} 都呈先升后降趋势;而吸附率随时间的延长几乎不变化,斜率接近零。

2.5 影响因素间互作效应分析

通过对回归方程的分析可知, X_1X_2 、 X_4X_5 影响极显著,响应面图见图3。

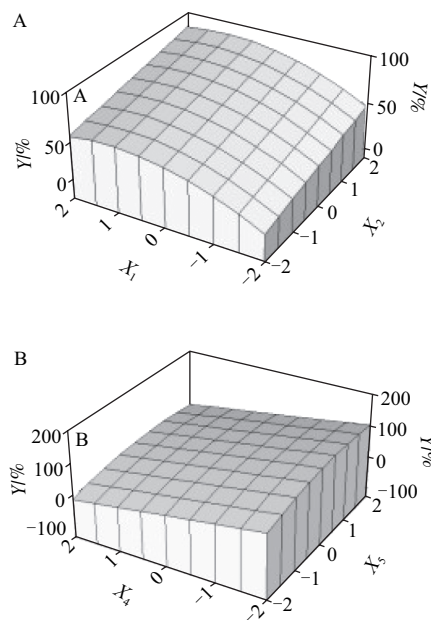


图3 pH值与温度(A)以及质量浓度与加入量(B)的互作效应
Fig.3 Response surface plots showing the effects of X_1 and X_2 (A) as well as X_4 and X_5 (B) on adsorption efficiency

由图3A可知,在pH值较低时,随着温度的升高,吸附率明显增加,而当pH值较大时,随着温度的不断升高,吸附率逐渐增加并缓慢下降,可见二者的比例必须适当,若失调,将直接影响吸附的效果。当pH2、温度20℃时,吸附率最小为17.2162%;而pH8、温度100℃时,麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附效果最好,达到最大吸附率87.6617%。

由图3B可知,在质量浓度较低时,随着加入量的增加,吸附率逐渐缓慢增高并下降趋势,吸附率随着质量浓度的加大呈现明显下降的趋势。当质量浓度100mg/L、加入量0.4g/100mL时,吸附率最小为0.0062%;而质量浓度20mg/L、加入量1.6g/100mL时,麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附效果最好,达到最大吸附率99.9768%。

2.6 麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附的最佳参数组合

通过计算机模拟寻优得出麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附的优化组合为:pH值在1水平(8)、温度在2水平(100℃)、时间在1水平(1h)、质量浓度在-2水平(20mg/L)、加入量在1水平(1.6g/100mL),在此条件下麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附率为99.99%。按照最佳参数对优化结果进行验证,其实测吸附率 $Y=98.91\%$,与理论值 $Y=99.99\%$ 较接近,进一步验证了数学回归模型的合理性。

2.7 Pb^{2+} 的吸附等温线

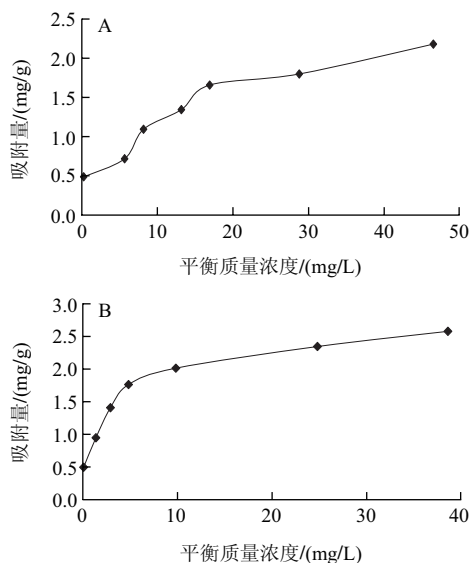


图4 20℃(A)和40℃(B)时 Pb^{2+} 平衡质量浓度与吸附量的关系
Fig.4 Relationship between adsorption rate equilibrium concentration at different temperatures

由图4可见,平衡质量浓度在4~16mg/L时,吸附等温线几乎呈直线型,吸附量变化比较大,说明麦麸渣对低质量浓度的 Pb^{2+} 溶液吸附效果好;平衡质量浓度大于16mg/L时,吸附等温线呈L型,吸附量变化趋于平缓,这可能是由于麦麸渣对 Pb^{2+} 溶液的吸附以单分子层吸附为主,且吸附已达到极限^[15-17]。总体上吸附等温线的变

化趋势符合Langmuir等温式和Freundlich等温式的要求,以式(1)和式(3)为目标函数,运用一元线性回归做有关运算,所得参数见表4。

表4 Langmuir和Freundlich等温式有关参数
Table 4 Correlation coefficients of Langmuir and Freundlich isotherm equations at different temperatures

温度/℃	Langmuir等温式相关系数 r	Freundlich等温式相关系数 r
20	0.9741	0.9884
40	0.9390	0.9716

表4显示: Freundlich等温式的相关系数较Langmuir等温式更接近于1, 可知Freundlich吸附等温式能更好的描述吸附温度为20℃和40℃时麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附情况。

2.8 Pb^{2+} 的吸附动力曲线实验

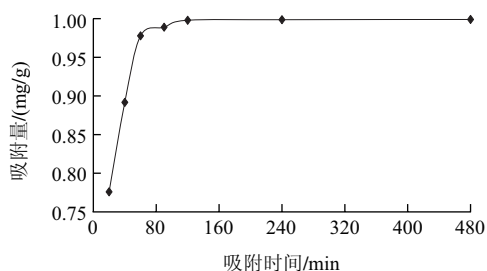


图5 吸附速率曲线

Fig.5 Time course of Pb^{2+} adsorption

由图5可知, 麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附, 在吸附时间小于60min时, 吸附量随时间变化几乎呈直线上升, 而当吸附时间超过60min的, 吸附量的增加趋于平缓, 这可能是由于吸附阻力随着麦麸渣表面吸附的 Pb^{2+} 的增多而增大^[15]。

将以上实验数据分别与式(4)和式(5)两个动力学模型拟合, 得到的有关动力学参数如表5所示: 一级动力学模型相关系数 r 为0.9132; 二级动力学模型相关系数 r 为0.9999, 更接近于1。因此麦麸对 Pb^{2+} 的吸附动力学用二级动力学模型描述更合适。

表5 吸附动力学有关参数
Table 5 First-order and second-order adsorption kinetics parameters

参数	吸附动力学一级模型		吸附动力学二级模型	
	k_1/min^{-1}	r	$k_2/(\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min}))$	r
铅离子	-0.0025	0.9132	2.0216	0.9999

2.9 麦麸渣与活性碳的吸附能力的对比

麦麸渣与活性碳的吸附能力的对比结果如图6所示, Pb^{2+} 溶液初始质量浓度为10mg/L时, 麦麸渣的吸附效果明显优于活性炭; 初始质量浓度为20、50mg/L时, 活性炭和麦麸渣吸附效果基本持平。可见对于低质量浓度的 Pb^{2+} 溶液, 麦麸渣的吸附效果好于活性炭。

造成此种差异的原因可能是两者的吸附机理不同。活性炭的特性决定了其对 Pb^{2+} 的吸附属物理吸附, 麦麸

渣主要成分是纤维素^[18-19], 纤维素本身具有很强的重金属整合能力^[20-22], 尤其是本实验所用麦麸渣经过酸碱处理, 理论上具有更强的重金属整合能力^[16]。根据麦麸渣成分特性及图6所示实验结果, 结合前人研究^[17], 推测麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附可能既有物理吸附又有化学吸附, 且以物理吸附为主, 化学吸附为辅, 从而对图6所示结果做如下分析: 当 Pb^{2+} 溶液初始质量浓度较低时, 麦麸渣在物理吸附和化学吸附共同作用下, 吸附效果较活性炭好; 当 Pb^{2+} 溶液初始质量浓度较高时, 麦麸渣的物理吸附能力没有活性炭好, 容易达到饱和, 且化学吸附作用有限, 所以吸附效果和活性炭持平。

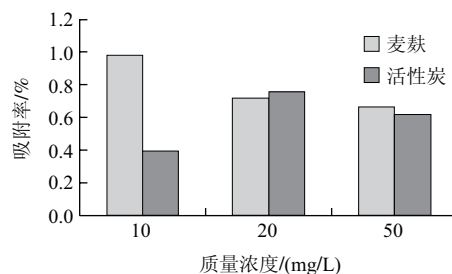


图6 麦麸渣与活性炭吸附能力对比

Fig.6 Comparison of adsorption efficiencies of WBDF and activated carbon for Pb^{2+}

3 讨论与结论

3.1 麦麸渣对 Pb^{2+} 吸附的回归数学模型为: $Y=67.56718+9.52691X_1+7.35677X_2+0.09693X_3-20.27575X_4+8.44184X_5-4.14591X_1^2+0.36798X_2^2-1.90632X_3^2-1.36466X_4^2-5.18757X_5^2-2.83203X_1X_2+1.13932X_1X_3+1.79036X_1X_4-0.68359X_1X_5-1.20443X_2X_3+2.18099X_2X_4+0.61849X_2X_5+1.72526X_3X_4-1.79036X_3X_5+4.32943X_4X_5$ 。通过分析此模型在本实验范围内能较准确预测麦麸叶渣对 Pb^{2+} 的吸附率。

3.2 从回归模型可知, 当pH8、温度100℃、时间1h、质量浓度20mg/L、加入量1.6g/100mL时, 麦麸渣对 Pb^{2+} 的最高吸附率为99.99%。据此条件进行验证, 其实测值为98.91%, 与理论值基本一致, 进一步验证了数学回归模型的合理性。

3.3 麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附以单分子层吸附为主。Freundlich吸附等温式能更好的描述麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附热力学情况。

3.4 当吸附时间小于60min时, 麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附为快速吸附, 而当吸附时间超过60min时为慢速吸附, 麦麸渣对 Pb^{2+} 的吸附动力学可以用二级动力学模型描述。

3.5 对于低质量浓度的 Pb^{2+} 溶液, 麦麸渣的吸附效果好于活性炭。



可见该模型较好地反映出 Pb^{2+} 的吸附条件，利用麦麸渣吸附 Pb^{2+} 不仅提高了吸附率，而且也提高了麦麸渣的利用价值，本实验为开发麦麸渣这种无残留、无毒副作用、安全无污染、清洁环保的新型绿色生物吸附材料提供理论参考。

参考文献：

[1] 杨红玉, 王焕校. 某些绿藻对六价铬的富集作用及其毒性反应[J]. 环境科学学报, 1990, 10(1): 64-71.

[2] 阎海, 潘纲, 霍润兰. 铜、锌和锰抑制月形藻生长的毒性效应[J]. 环境科学学报, 2001, 21(3): 328-332.

[3] 陈国祥, 施国新, 何兵, 等. Hg、Cd对药菜越冬芽光合膜光化学活性及多肽组分的影响[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 521-525.

[4] 杨正亮, 冯贵颖, 呼世斌, 等. 水体重金属污染研究现状及治理技术[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 23(1): 219-222.

[5] 阎海, 王杏君, 林毅雄, 等. 铜、锌和锰抑制蛋白核小球藻生长的毒性效应[J]. 环境科学, 2001, 22(1): 23-26.

[6] 邵焕霞. 胡萝卜渣中膳食纤维提取工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2009(4): 55-58.

[7] 曹树稳, 黄绍华. 几种膳食纤维的制备工艺研究[J]. 食品科学, 1997, 18(6): 41-45.

[8] 相波, 李义久. 吸附等温式在重金属吸附性能研究中的应用[J]. 有色金属, 2007, 59(1): 77-80.

[9] 张巧艳, 钱俊青. 响应面优化黄杆菌突变株产脂肪酶摇瓶发酵条件[J]. 浙江工业大学学报, 2009, 37(2): 156-160.

[10] 吴涓, 李清彪. 重金属生物吸附的研究进展[J]. 离子交换与吸附, 1988, 14(2): 180-187.

[11] LANGMUIR I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids[J]. J Am Chem Soc, 1917, 39(9): 1848-1906.

[12] BELLOT J C, CONDORET J S. Modelling of liquid chromatography equilibria[J]. Process Biochem, 1993, 28(6): 365-376.

[13] 周祖康, 顾得人, 马季铭. 胶体化学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1987: 12; 114-116; 248.

[14] 徐啸, 刘伯羽, 邓正栋. 活性炭吸附重金属离子的影响因素分析[J]. 能源环境保护, 2010, 24(2): 48-50.

[15] 赵振国. 吸附作用应用原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 71-73; 133-138; 191-200; 309.

[16] 李小敏. 桔皮纤维素生物吸附剂的制备及其对重金属的吸附研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2000.

[17] 敖晓奎. 速溶茶渣对废水中重金属离子的吸附行为和机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.

[18] 史红兵, 宋纪蓉, 黄洁, 等. 苹果渣制备可溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2002, 32(2): 148-150.

[19] 邓红, 宋纪蓉, 史红兵. 苹果渣水不溶性膳食纤维的提取及脱色工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(5): 10-13.

[20] 欧仕益, 高孔荣, 吴晖. 麦麸膳食纤维清除重金属离子的研究[J]. 食品科学, 1998, 19(5): 7-10.

[21] 邓安彬. 竹笋及笋渣膳食纤维的提取工艺及其理化特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.

[22] 杨贤庆, 李来好, 戚勃. 4种海藻膳食纤维对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 的吸附作用[J]. 中国水产科学, 2007, 14(1): 132-138.