

荸荠皮渣改性产物作为重金属吸附剂的研究

党子建, 黄惠华

(华南理工大学轻工与食品学院, 广东广州 510640)

摘要: 荸荠皮渣经过预处理后进行改性: 在吡啶试剂回流的情况下与琥珀酸酐反应, 以引入羧基官能团。得到的改性荸荠皮渣进行重金属吸附, 分别就金属离子初始浓度、pH 和吸附时间进行吸附过程的研究。并对改性荸荠皮渣的吸附特性与机理进行了初步研究与探讨。结果表明: 改性荸荠皮渣 (MWCP) 对三种重金属离子 (Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+}) 具有显著的吸附作用, 400 mg/L 浓度下, 吸附 4 h 基本达到吸附平衡: Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 分别达到 44.80 ± 2.68 mg/g、 80.73 ± 6.25 mg/g、 45.94 ± 3.15 mg/g; Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 的最佳 pH 分别为 5.5、5.6 和 7.8; 吸附过程是一种化学吸附过程, 对吸附动力学的拟合较为符合拉格朗日假二级拟合模型; 吸附等温模型比较符合 langmuir 等温吸附; 红外图谱的相关吸收峰的变化说明荸荠皮渣发生了羧基化改性反应。

关键词: 荸荠皮渣; 纤维素; 重金属; 吸附

文章编号: 1673-9078(2013)8-1837-1842

Characterization of Modified Peel Dreg Cellulose of Chinese Water Chestnut as Heavy Metal Ion Sorption Agent

DANG Zi-jian, HUANG Hui-hua

(College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In this research, carboxylic functional group was introduced into the fibre backbone of peel dreg of Chinese water chestnut by succinic anhydride modification in pyridine. The adsorption capability of the modified peel dreg on Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} was influenced by the initial metal concentration, adsorption time and solution pH value. The maximum adsorption capacities of modified peel dreg of Chinese water chestnut reached 44.80 ± 2.68 mg/g for Cu^{2+} at pH 5.5, 80.73 ± 6.25 mg/g for Pb^{2+} at pH 5.6 and 45.94 ± 3.15 mg/g for Cd^{2+} at pH 7.8. As an chemical style, the kinetics of adsorption process was accorded with lagrange pseudo second-order model. The adsorption isothermal experimental data coincided well with Langmuir model. FT-IR analysis indicated that the carboxylation reaction took place during the modification of the Chinese water chestnut peel.

Key words: modified Chinese water chestnut peel dregs; cellulose; heavy metals; adsorption

荸荠, 别名马蹄, 属莎草科多年水生草本植物。荸荠作为果蔬两用型食品, 具有丰富的营养价值和药用价值^[1]。古称凫茨, 为我国典型的传统中药, 具有药膳同源之功效, 不光其质脆味佳, 营养丰富, 汁多味甜, 自古有“地下雪梨”之美誉, 北方人称为“江南人参”^[2-4]。据不完全统计, 我国每年荸荠产量超过 80 万吨, 而且产量还有上升趋势, 作为荸荠生产大国, 长期以来仅限于简单的如马蹄淀粉、饮料、罐头的生产, 而产粉废浆、废渣往往弃去, 处理不好还会造成环境污染^[5]。研究表明荸荠果皮约占总荸荠质量的 26%^[3], 这样每年产生的荸荠皮在 21 万 t 以上这些

收稿日期: 2013-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31271978); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120172110017)

作者简介: 党子建 (1988-), 男, 硕士, 研究方向: 食品科学

通讯作者: 黄惠华 (1965-), 男, 博士, 教授

荸荠皮大多被作为饲料或直接作为垃圾处理, 没有得到充分利用, 造成了极大的资源浪费。

工业废水中重金属污染具有非常强的扩散性, 难控制^[6], 重金属离子可以通过食物链富集作用进入人体并积累, 导致各种疾病和机能紊乱, 对环境和人体的危害很大, 同时重金属不像染料等可以进行生物降解, 这更增加了重金属的处理难度。日本发生的水俣病和痛痛病的元凶就是含汞废水和含镉废水。大量研究表明, 重金属的危害是多方面的, 且具有长期性。由于工业的快速发展和我国环保措施的相对滞后, 导致大量重金属废水的聚集, 近几年重金属污染事件频发, 含重金属离子废水的处理刻不容缓。主流的如氧化还原法、化学沉淀法、电解法、离子交换法、活性炭吸附法等, 这些方法在净化效率、成本或者便利度等方面都有一些问题^[7]。

本研究尝试把荸荠皮渣经过改性处理, 得到一种

能吸附工业废水中重金属离子的吸附剂, 并对吸附的机理进行初步研究与探讨。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂

新鲜荸荠皮, 市售; 无水硫酸铜、水合氯化镉、硝酸铅、吡啶、琥珀酸酐、氨水、EDTA、甲基百里酚蓝、铬黑 T, 均为国产分析纯。

1.2 主要仪器设备

屹立粉碎机, 浙江屹立工贸有限公司; PHS-25 计, 上海虹益仪器仪表有限公司; 电热鼓风干燥箱 101-1 型, 上海锦屏仪器仪表有限公司通州分公司; SZCL 型磁力搅拌器, 江苏省金坛市金南仪器厂; TDL-5A 离心机, 上海安亭科学仪器厂; 微量滴定管; WS70-1 红外光谱仪, 上海市吴淞市五金厂; Sartotius BSA124S-CW 天平。

1.3 试验方法

1.3.1 荸荠皮渣的制备

收集荸荠皮在阳光下晒干, 用粉碎机粉碎后过 100 目筛。

1.3.2 荸荠皮渣的预处理

荸荠皮渣在烘箱中干燥 24 h 后得到干燥荸荠皮渣 WCP。取 30 g WCP, 加入 450 mL 20% 的异丙醇溶液后在三角锥形瓶中磁力搅拌 24 h, 用蒸馏水洗涤至无色。残渣于 50 °C 烘箱中干燥 24 h。干燥后残渣与 480 mL 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液于三角锥形瓶中磁力搅拌 2 h, 过滤得到滤渣。用蒸馏水洗至中性, 在 50 °C 烘箱中干燥 24 h, 获得预处理的荸荠皮渣 (RWCP) [8]。

1.3.3 荸荠皮渣的改性工艺

预处理的荸荠皮渣在有吡啶试剂的锥形瓶中与琥珀酸酐按 1:3 的比例进行反应, 常温反应 24 h。过滤, 并依次用 1 mol/L 的醋酸一二氯甲烷溶液、95% 的乙醇、蒸馏水、0.1 mol/L 盐酸、丙酮和无水乙醇洗涤。残渣在 50 °C 烘箱中干燥 24 h, 即可得到改性荸荠皮渣 (MWCP) [9~10]。

1.3.4 羧基官能团含量的测定

根据 Gurgel 和 Karnitz 报道的滴定法进行测定: 100 mg 样品与过量氢氧化钠溶液 (100 mL 0.01 mol/L) 于锥形瓶中反应, 磁力搅拌 1 h。过滤后, 取 25 mL 滤液用已标定的盐酸溶液 (0.01 mol/L) 滴定 [9,11]。即可以根据下面公式算出官能团含量:

$$C_{COOH} = \frac{(C_{NaOH} \times V_{NaOH}) - (4 \times C_{HCl} \times V_{HCl})}{m}$$

注: C_{NaOH} 为氢氧化钠溶液浓度 (mmol/L); C_{HCl} 为盐酸溶液浓度 (mmol/L); V_{NaOH} 为氢氧化钠溶液加入总体积 (mL); V_{HCl} 为中和过量氢氧化钠消耗的盐酸溶液体积 (mL); m 为改性样品质量 (g)。

1.3.5 改性荸荠皮渣染料吸附研究

分别配制 400 mg/L 的 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 作为模拟重金属离子废水, 量取 10 mL 磁力搅拌下添加 0.01 g 荸荠皮渣改性纤维素, 常温搅拌一定时间后, 取适量废水在 4000 r/min 下离心 10 min, 通过 EDTA 滴定法进行滴定, 滴定时溶液 pH 分别为 11.5、10.0 和 12.0。甲基百里酚蓝为 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的指示剂, 铬黑 T 为 Cd^{2+} 的指示剂 [12], 研究改性皮渣纤维素对三种染料的吸附容量随 pH、浓度和时间的变化情况。

$$\text{吸附容量公式: } Q = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{m}$$

注: 其中 Q 为吸附容量, 单位为 mg/g; C_0 , C_t 为在初始时刻和 t 时刻的重金属离子浓度; V 为废水的体积; m 为吸附剂的质量。

1.3.6 吸附动力学的研究

对荸荠皮渣素吸附三种重金属离子进行吸附动力学的研究分析。

1.3.7 吸附等温线的研究

以 Cu^{2+} 为例, 对吸附过程进行吸附等温研究。Langmuir 吸附等温线是一类单分子层吸附理论; Freundlich 吸附是指不同的吸附位点需要不同的吸附能量的一类吸附。公式分别如下:

$$C_e/Q_e = C_e/Q_m + 1/K_L Q_m, \quad (1-1)$$

$$\lg Q_e = \lg K_F + (1/n) \lg C_e \quad (1-2)$$

注: C_e -模拟溶液的吸附平衡浓度 (mg/L); Q_e -吸附剂平衡吸附容量 (mg/g); Q_m -单层吸附条件下最大吸附容量 (mg/g); K_L 、 K_L 、 K_F 、 n 均为常数。

1.3.8 红外光谱分析

以荸荠皮渣素改性过程中的未改性纤维素和改性纤维素进行红外光谱分析, 取 1~2 mg 各物质, 加入 100 mg KBr 充分研磨、压片, 用傅立叶红外光谱仪于 4000~500 cm^{-1} 波长范围内扫描。

1.4 数据统计

采用 SPSS8.0 进行实验数据的线性回归和方差分析, 并采用均值±标准差 ($\bar{x} \pm SD$) 表示

2 结果与讨论

2.1 改性荸荠皮渣的羧基含量和红外光谱分析

改性后的荸荠皮渣通过滴定法测得羧基含量为 $1.61 \pm 0.08 \text{ mmol/g}$ 。

将 WCP、RWCP、MWCP 分别用扫描电镜扫描，得到红外光谱图，如下图 1 所示。WCP 在 1732 cm^{-1} 处有吸收峰，此处为 C=O 键的伸缩振动，RWCP 样品中此峰消失了，可能原因是初始荸荠皮中的纤维素的乙酰基、果胶中羧基在预处理中被去除了；而 MWCP 在 1734 cm^{-1} 处出现了相当强的锐峰，说明经过在吡啶中与琥珀酸酐发生改性反应，已成功加上了羧基基团，说明改性是成功的；指纹区另外 MWCP 在 3359 cm^{-1} 处吸收峰的左移，证明羟基发生了反应；而 1045 cm^{-1} 处的变化也说明了改性反应的发生。

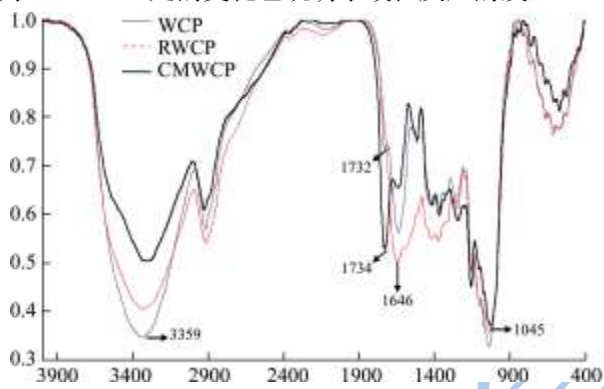


图 1 荸荠皮渣改性前后的红外光谱图

Fig.1 FT-IR spectrum of Chinese water chestnut and its modified products

2.2 荸荠皮渣对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附效果

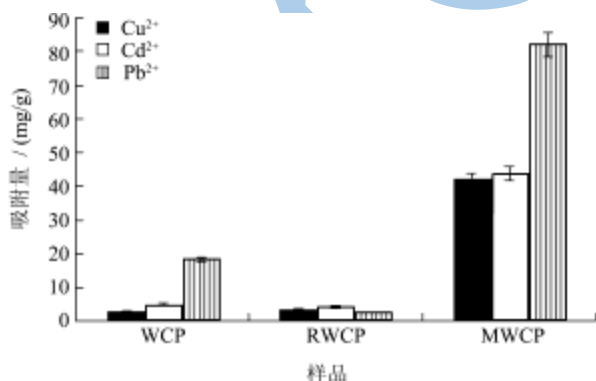


图 2 三种荸荠皮渣对三种重金属离子的吸附

Fig.2 Adsorption of Chinese water chestnut peel dreg on three heavy metal ions

分别就 WCP、RWCP、MWCP 三种样品进行重金属离子吸附。得到的结果如图 2 所示。MWCP 对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附量分别达到 $42.05 \pm 1.66 \text{ mg/g}$ 、

$93.47 \pm 2.51 \text{ mg/g}$ 、 $43.82 \pm 2.06 \text{ mg/g}$ 。相比于未改性的 WCP 和 RWCP，改性过的荸荠皮渣 MWCP 具有明显的吸附效果。RWCP 的吸附效果较 WCP 好的原因可能是预处理过程中果胶和半纤维素被除去，与重金属离子吸附结合变得较为容易；而改性后的荸荠皮渣由于改性反应增加了大量的羧基官能团，能更多的吸附结合重金属离子，因此具有较大的吸附效果，另外氢键的解离也是吸附量增加的一个原因。

2.3 改性荸荠皮渣对 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附

因素研究

2.3.1 pH 对 MWCP 吸附 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 三种离子的影响

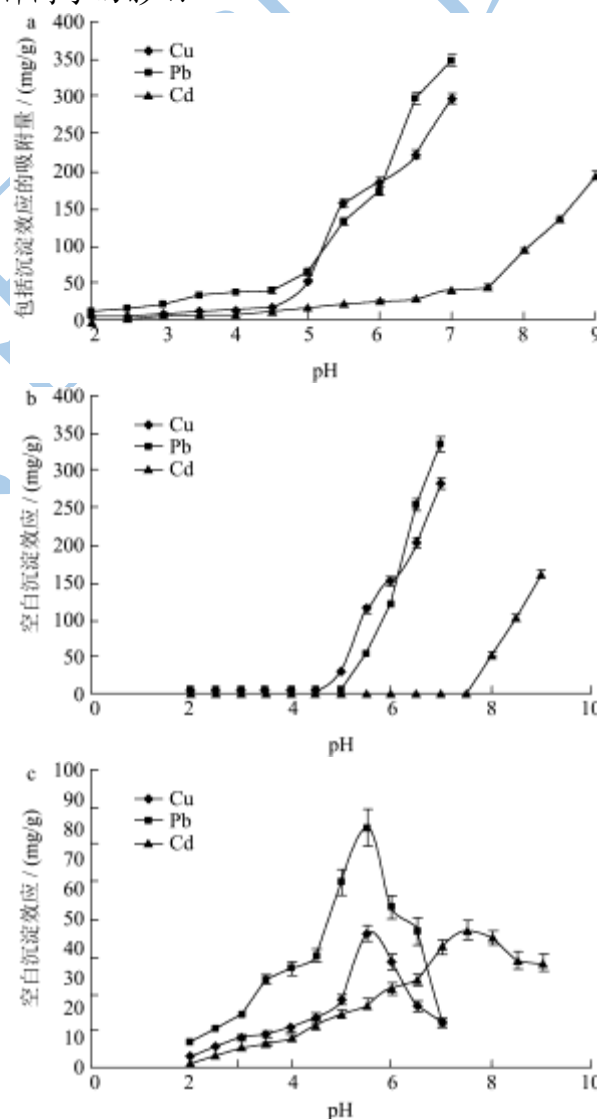


图 3 不同 pH 对改性荸荠皮渣吸附三种重金属离子的影响

Fig.3 Effect of pH on adsorption of the modified chestnut peel dreg on three heavy metal ions

研究 pH 对 MWCP 吸附效果的影响必须扣除沉淀

效应,因此做不加吸附剂的空白对照进行滴定。由图 3a 可知, MWCP 对三种离子的吸附量随着 pH 的增大, 呈现上升趋势。Cu²⁺和 Pb²⁺在 pH 大于 5 时, 增长趋势明显, 而 Cd²⁺在大于 7 之后增长明显。由图 3b 所示, Cu²⁺、Pb²⁺和 Cd²⁺分别在 5、5.5 和 8 时出现了较为明显的沉淀效应。而从图 3c 则可明显看出 Cu²⁺、Pb²⁺和 Cd²⁺ 分别在 5.5、5.6 和 7.8 处具有最大吸附量。

在低 pH 时, MWCP 对三种离子吸附较小, 可能是因为酸性条件下 H⁺对结合位点的竞争关系所致; 而高 pH 情况下吸附量的降低可能是由于金属离子沉淀效应以及羟基复合产物增加^[3], 导致沉淀量的极速增加, 吸附量的急剧下降。由图可知, 最适 pH 时三种重金属离子的最大吸附量为 44.80±2.68 mg/g、80.73±6.25 mg/g、45.94±3.15 mg/g。

2.3.2 浓度对 MWCP 吸附 Cu²⁺、Pb²⁺和 Cd²⁺ 三种离子的影响

金属离子初始浓度对 MWCP 吸附容量的影响如图 4 所示。三种离子的吸附量随着浓度的增大呈现逐渐增加趋势, 这可能是因为随着两相浓度梯度差增大, 相互接触几率增大的缘故。有研究表明^[14]液相和固相(改性吸附剂)间增加的浓度梯度能够提高驱动力和传质速率, 能很好地解释本实验的研究成果。但三种重金属离子的吸附百分比随着浓度增高呈现的则是逐渐下降趋势, 这可能是金属离子随浓度增高导致金属离子之间的竞争加剧的缘故。在相同浓度下, 三种离子中以 Pb²⁺的吸附率最高可能是 MWCP 对三种离子的吸附亲和力不同所致。

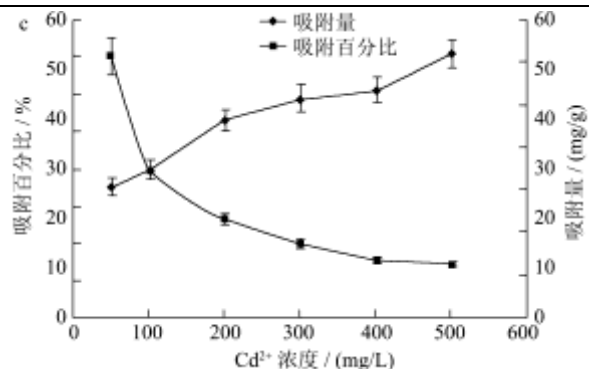
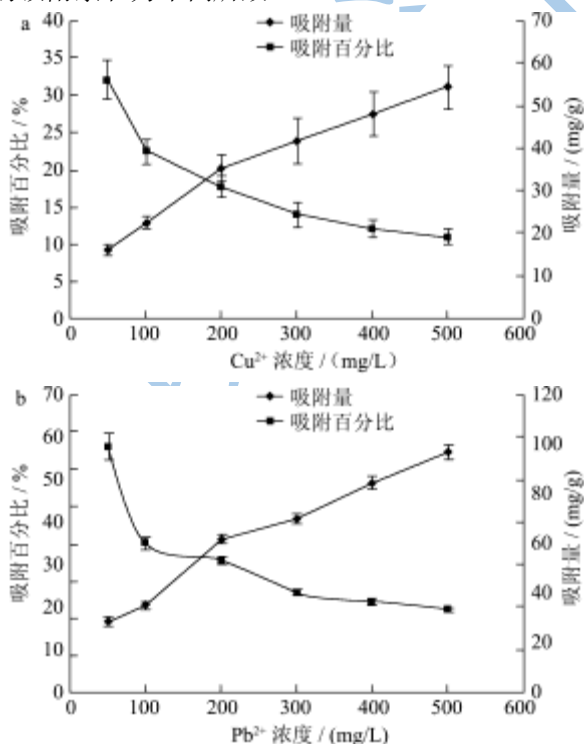


图 4 不同离子浓度对改性荸荠皮渣吸附三种重金属离子的影响

Fig.4 Effect of ion concentration on adsorption of the modified peel dreg on three heavy metal ions

MWCP 对 Cu²⁺、Pb²⁺两种重金属离子的吸附在 200 mg/L 时吸附百分比和和吸附量达到一个相对比较高的水平, 为吸附的最佳浓度, Cd²⁺的吸附在 100 mg/L 时吸附百分比和和吸附量达到一个较好的平衡, 为最佳浓度。

2.3.3 吸附时间对 MWCP 吸附 Cu²⁺、Pb²⁺和 Cd²⁺ 三种离子的影响

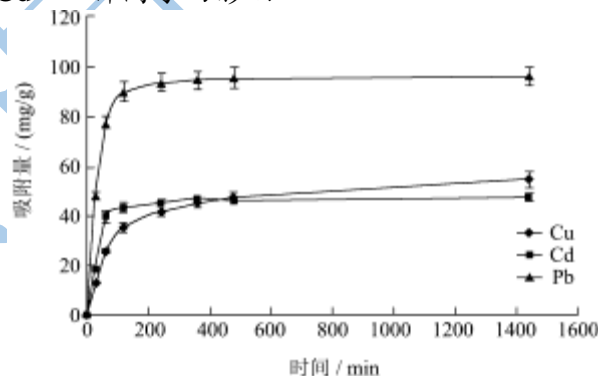


图 5 改性荸荠皮渣对三种重金属离子的吸附动力学

Fig.5 Adsorption kinetics of the modified Chinese water chestnut peel dreg for three heavy metal ions

通过研究改性荸荠皮渣对 Cu²⁺、Pb²⁺和 Cd²⁺三种重金属离子的吸附实验, 发现: 如图 5 所示, 改性荸荠皮渣对三种重金属离子都具有显著的吸附作用, 240 min 内吸附基本达到平衡; 改性荸荠皮渣对三种重金属离子的吸附差别, 具体主要表现在吸附速度上, Cu²⁺在 200 min 之后吸附趋于平衡, Pb²⁺和 Cd²⁺在 120 min 内已经基本达到吸附平衡。吸附曲线呈现的曲线形状较为符合 Langmuir 吸附模型。

2.4 荸荠皮渣对 Cu²⁺、Pb²⁺和 Cd²⁺的吸附动力学研究

为了更好的研究 MWCP 对三种重金属离子的吸

附过程,对吸附动力学进行假一级和假二级拉格朗日拟合。结果如图6、7所示:

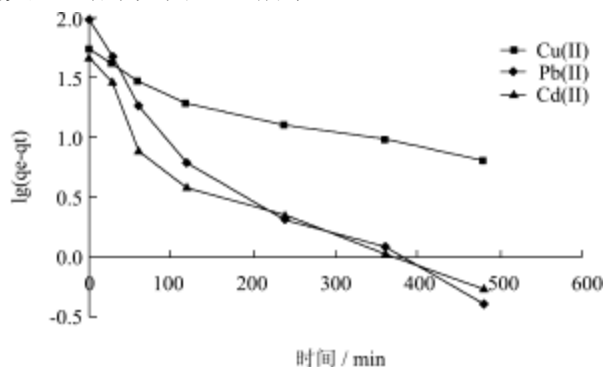


图6 改性荸荠皮渣对三种重金属离子的拉格朗日假一级吸附拟合

Fig.6 Pseudo first-order kinetic plots for Vat Yellow G adsorption of MWCP

MWCP 对三种重金属离子吸附过程的两种拟合曲线相比较而言:假二级拟合对吸附过程的线性拟合度更高;从表1中知,假二级动力学模型的线性相关

表1 改性荸荠皮渣对三种染料的拟合结果

Table 1 Adsorption model fitting result for three dyes of MWCP

离子	qe 实测值 (mg/g)	假一级动力学模型			假二级动力学模型		
		qe/(mg/g)	$K_1/(\text{min}^{-1})$	R^2	qe/(mg/g)	$K_2/(\text{mg/g}\cdot\text{min})$	R^2
Cu	44.80	41.62	4.15×10^{-3}	0.939	57.80	1.89×10^{-4}	0.9994
Pb	80.73	46.35	1.06×10^{-2}	0.9268	97.09	8.92×10^{-4}	0.9996
Cd	45.94	22.90	8.52×10^{-3}	0.8846	47.62	1.22×10^{-3}	0.9991

因此,可以说 MWCP 对重金属离子的吸附过程为化学吸附,改性后的羧基官能团与金属离子进行了结合,从而把重金属离子从模拟废液中分离了出来。

2.5 改性荸荠皮渣对 Cu^{2+} 的吸附等温研究

根据第四章关于吸附等温线的研究,以对 Cu^{2+} 吸附进行吸附等温曲线的绘制。

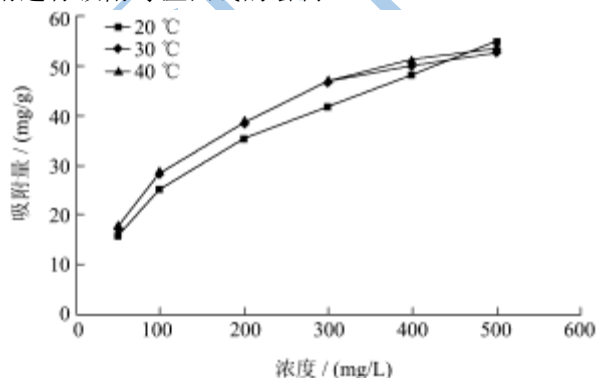


图8 MWCP 对 $\text{Cu}(\text{II})$ 的等温吸附线

Fig.8 Adsorption isotherm of MWCP for $\text{Cu}(\text{II})$

研究改性荸荠皮渣 20 °C、30 °C、40 °C 的吸附等温曲线,如图8所示,各温度下的吸附线的斜率随着

系数基本都达到 0.999 以上,有良好的线性性质,相反假一级动力学模型的线性相关系数较低,且除了 Cu^{2+} 外,其他两种离子得出的理论饱和和吸附量与实际吸附量差距较大。这都说明改性荸荠皮渣对三种重金属离子的吸附过程遵循拉格朗日二级动力学吸附。

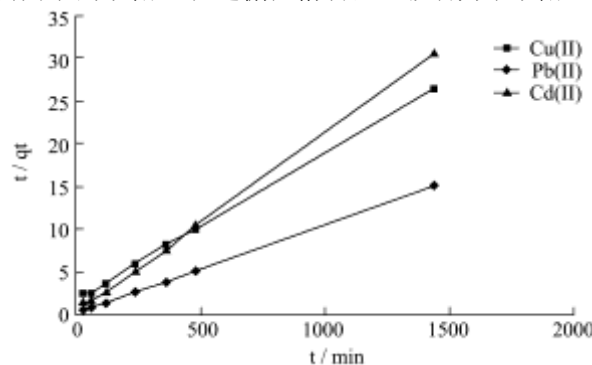


图7 改性荸荠皮渣对三种重金属离子的拉格朗日假二级吸附拟合

Fig.7 Pseudo second-order kinetic plots for Vat Yellow G adsorption of MWCP

浓度增加逐渐变小,不符合亨利吸附。随着温度的升高,吸附率有一定程度的上升,即升高温度有利于吸附过程。可能原因是分子移动速度加快,增加了结合的可能。

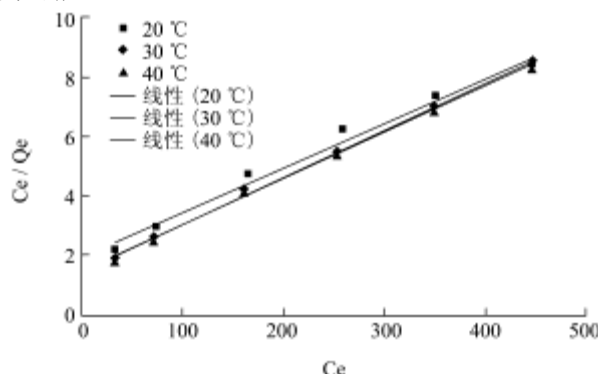


图9 MWCP 对 $\text{Cu}(\text{II})$ 的 Langmuir 等温吸附线

Fig.9 Langmuir adsorption isotherm of MWCP for $\text{Cu}(\text{II})$

将数据代入方程(1-1)可得 Langmuir 吸附等温线,如图9所示:在 30 °C 和 40 °C,相关系数都达到 0.99 以上,20 °C 也达到 0.9813,说明基本适合 Langmuir 等温吸附,这种吸附为单分子层吸附,三个温度下的饱和吸附量达到 64.52 mg/g、62.89 mg/g、

64.52 mg/g。

将数据代入方程(1-2)可得 Freundlich 吸附等温线,如图 10 所示:不同温度下的吸附等温线拟合可知,除了 20 °C 条件下相关系数达到 0.9939 外,其他温度对 Freundlich 拟合的相关系数相比 Langmuir 均较低,但也达到 0.97 左右,所以也基本符合 Freundlich 吸附。

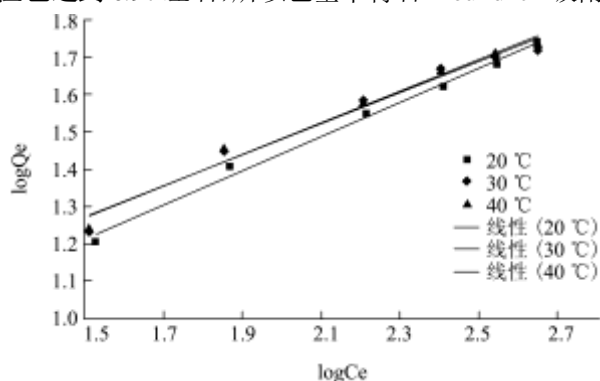


图 10 MWCP 对 Cu(II) 的 Freundlich 等温吸附线

Fig.10 Freundlich adsorption isotherm of MWCP for Cu(II)

综上可知,改性荸荠皮渣纤维对 Cu^{2+} 吸附既符合 Langmuir 吸附,也符合 Freundlich 吸附,相对来说更符合 Langmuir 吸附,可能两种吸附均有发生,为两种吸附共同作用的一种化学吸附,并且升高温度有利于吸附的进行。

3 结论

3.1 红外图谱的相关吸收峰的变化说明改性荸荠皮渣发生了羧基化的改性反应。改性后的荸荠皮渣通过滴定法测定得到羧基含量为 1.61 ± 0.08 mmol/g。

3.2 荸荠皮渣经过在吡啶中与琥珀酸酐反应改性后对三种重金属离子具有显著的吸附作用,改性后的荸荠皮渣对三种重金属离子 Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 吸附的最适 pH 分别在 5.5、5.6 和 7.8 处,吸附浓度其吸附量分别为 44.80 ± 2.68 mg/g、 80.73 ± 6.25 mg/g、 45.94 ± 3.15 mg/g。

3.3 吸附动力学的研究表明:MWCP 对三种重金属离子的吸附过程符合拉格朗日假二级拟合曲线,且线性相关系数都达到 0.999 以上,为化学吸附。

3.4 吸附等温线的研究表明:MWCP 改性荸荠皮渣对 Cu^{2+} 吸附既符合 Langmuir 吸附,也符合 Freundlich 吸附,更符合 Langmuir 吸附,可能为两种吸附共同作用的一种化学吸附,并且升高温度有利于吸附的进行。

参考文献

[1] 刘念兴.荸荠小档案[J].饮食科学,2004,12:28
Liu N X. Small File of Chinese Water Chestnut [J]. Diet Science, 2004, 12: 28

[2] 刑湘臣.江南人参-荸荠[J].蔬菜,2002,5:40
Xing X C. Southern Ginseng-Chinese Water Chestnut [J]. Vegetables, 2002, 5: 40

[3] 孔德荣,马然,褚楠,等.6 种湖产食用植物营养素含量分析[J].济宁医学院学报,1998,21(4):50-51
Kong D R, Ma R, Zhu N, et al. The Nutrient Content Analysis of Six Edible Plants from Lake [J]. Journal of Jining Medical College, 1998, 21(4): 50-51

[4] 党子建,黄惠华.荸荠皮渣改性产物对染料的吸附研究[J].现代食品科技,2012,28(12):1652-1655.
Dang Z J, Huang H H. Study on Characteristics of Modified Chinese Water Chestnut Peel Dreg as a Dye Sorption Agent [J]. Modern Food Science and Technology, 2012, 28(12): 1652-1655

[5] 黎金玲.广西贺州市荸荠种植业发展制约因素分析[D]. 中国农业大学,2004
Li J L. The Analysis of Restraining Factors of Crop Farming of Chinese Water Chestnut in Hezhou [D]. China Agricultural University, 2004

[6] 孙立岩,姚志鹏,薛荔栋,等.浅谈地表水重金属污染监测现状及对策[J].环境监测与预警,2012,4(6):29-31,45
Sun L Y, Yao Z P, Xue L D, et al. Primary Discussion and Countermeasures on Heavy Metal Pollution Monitoring in Surface Water [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2012, 4(6): 29-31, 45

[7] 杜杰,张诚.综述低成本吸附剂处理含重金属废水的研究进展[J].粉煤灰综合利用,2006,5:49-52
Du J, Zhang C. Progress in the Studies on the Treatment of Heavy Metals Contaminated Water with low cost adsorbents [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2006, 5: 49-52

[8] Li X M, Tang Y R, Cao X J, et al. Preparation and evaluation of orange peel cellulose adsorbents for effective removal of cadmium, zinc, cobalt and nickel [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2008, 317: 512-521

[9] Gurgel L V A, Karnitz Júnior O, de Gil R P F, et al. Adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) from aqueous single metal solutions by cellulose and mercerized cellulose chemically modified with succinic anhydride[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 3077-3083

[10] Gurgel L V A, de Freitas R P, Gil L F. Adsorption of Cu(II), Cd(II), and Pb(II) from aqueous single metal solutions by sugarcane bagasse and mercerized sugarcane bagasse chemically modified with succinic anhydride [J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(4): 922-929

- [11] Karnitz J R O, Vinicius A G L, De M J C P, et al. Adsorption of heavy metal ion from aqueous single metal solution by chemically modified sugarcane bagasse [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(6): 1291-1297
- [12] 宋业林. 水质化验实用手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003
- Song Y L. *Practical Handbook of water quality testing* [J]. Beijing: China Petrochemical Press, 2003
- [13] Lu D, Cao Q, Li X, et al. Kinetics and equilibrium of Cu(II) adsorption onto chemically modified orange peel cellulose biosorbents [J]. *Hydrometallurgy*, 2009, 95(1-2): 145-152
- [14] Garg U, Kaur M P, Jawa G K, et al. Removal of cadmium (II) from aqueous solutions by adsorption on agricultural waste biomass [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1-3): 1149-1157

现代食品科技