

# 莴笋叶渣吸附 $\text{Cu}^{2+}$ 研究

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莴笋叶渣吸附  $\text{Cu}^{2+}$  条件进行优化, 建立加入量( $X_1$ )、质量浓度( $X_2$ )、时间( $X_3$ )、pH 值( $X_4$ )、温度( $X_5$ )5 个因素与吸附率( $Y$ )的回归模型为:  $Y = 85.45862 + 11.80098X_1 - 6.85546X_2 + 0.24918X_3 + 2.14203X_4 + 1.12124X_5 - 4.75315X_1^2 - 2.40953X_2^2 - 2.23141X_3^2 - 1.49228X_4^2 - 3.40533X_5^2 + 3.84570X_1X_2 + 0.61717X_1X_3 - 3.15888X_1X_4 - 0.26948X_1X_5 - 0.29760X_2X_3 + 0.77899X_2X_4 - 0.01867X_2X_5 - 0.23965X_3X_4 - 1.45840X_3X_5 + 0.94533X_4X_5$ 。各因素对莴笋叶渣吸附  $\text{Cu}^{2+}$  影响顺序为: 加入量 > 质量浓度 > pH 值 > 温度 > 时间, 在加入量 0.9g、 $\text{Cu}^{2+}$  质量浓度 30mg/L、时间 5h、pH3、温度 40℃ 条件下, 莴笋叶渣对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附率最高可达 98.40%。验证值为 97.96%, 与理论值基本一致。对于 60mg/L  $\text{Pb}^{2+}$  溶液, 莴笋叶渣为吸附剂时的最佳固液比为 12g/L; 莴笋叶渣对 中低质量浓度  $\text{Pb}^{2+}$  溶液的吸附效果好于活性炭。

**关键词:** 莴笋叶渣; 铜离子; 吸附; 优化; 二次回归正交旋转组合设计; 固液比

## Bio-adsorption of Copper Ions by Residue of Asparagus Lettuce Leaf

CHEN Li

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

**Abstract:** Copper ion adsorption conditions by asparagus lettuce leaf residue were optimized through quadratic regression orthogonal design. A quadratic regression orthogonal model was established to express relationship between adsorption rate ( $Y$ ) and five factors including addition amount ( $X_1$ ), concentration ( $X_2$ ), time ( $X_3$ ), pH ( $X_4$ ), and temperature ( $X_5$ ). The relationship was shown in the following equation:  $Y = 85.45862 + 11.80098X_1 - 6.85546X_2 + 0.24918X_3 + 2.14203X_4 + 1.12124X_5 - 4.75315X_1^2 - 2.40953X_2^2 - 2.23141X_3^2 - 1.49228X_4^2 - 3.40533X_5^2 + 3.84570X_1X_2 + 0.61717X_1X_3 - 3.15888X_1X_4 - 0.26948X_1X_5 - 0.29760X_2X_3 + 0.77899X_2X_4 - 0.01867X_2X_5 - 0.23965X_3X_4 - 1.45840X_3X_5 + 0.94533X_4X_5$ . The factor order on  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption rate from strong to weak was addition amount, concentration, pH, temperature and time. According to this model, conditions under 0.9 g addition amount of asparagus lettuce leaf residue in 30 mg/L for 5 h using pH 3 and 40 °C revealed the highest adsorption, which was 98.40%. The experiment result was consistent with the theoretical result of 97.96%. The best solid to liquid ratio of  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption by asparagus lettuce leaf residue is 12 g/L. In the low concentration of  $\text{Cu}^{2+}$  solution, the adsorption of asparagus lettuce leaf residue is better than activated carbon.

**Key words:** asparagus lettuce leaf residue;  $\text{Cu}^{2+}$ ; adsorption; optimization; quadratic regression orthogonal design; solid to liquid ratio

中图分类号: TQ028.15; TQ340.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)10-0131-05

重金属污染是一个极其重要的环境保护问题, 尤其是水体重金属污染。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<sup>[1-4]</sup>。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<sup>[5-6]</sup>。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<sup>[7-9]</sup>。二次正交旋转组合设计与传统的单因素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

收稿日期: 2010-3-15

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

多角度对模型进行模拟分析<sup>[10]</sup>。

本实验拟采用静置吸附法,以莴笋叶渣为生物吸附剂,应用二次回归正交旋转组合设计对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附率进行系统研究,以优化  $\text{Cu}^{2+}$  吸附条件,为莴笋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

新鲜莴笋 市购;蒸馏水 自制;硫酸铜、氢氧化钠、盐酸均为 A R 级。

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 莴笋叶渣的制取

在前人<sup>[11-12]</sup>研究的基础上,设置的莴笋叶渣制备工艺流程为:新鲜莴笋叶→取样→切片→预煮→榨汁取渣→过滤→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→过筛,获得 60 目的莴笋叶渣。

#### 1.2.2 标准曲线绘制

分别精密配制硫酸铜标准溶液 10、20、30、40、50mg/L,用原子吸收分光光度仪作 3 次平行试验,测其吸光度,绘制标准曲线。线性方程为  $y = 0.0147x + 0.1118$ ,  $R^2 = 0.9993$ 。表明该标准溶液在 5~50mg/L 范围内呈良好的线性关系。

#### 1.2.3 五因素二次回归正交旋转组合设计

在已有单因素试验结果<sup>[13-15]</sup>的基础上,对影响  $\text{Cu}^{2+}$  吸附的关键因素进行优化,以期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:纤维素加入量、硫酸铜溶液质量浓度、时间、pH 值、温度。选择 5 因素的上下限值( $Z_{1j}$ ,  $Z_{2j}$ )。计算各影响因素的零水平( $Z_{0j}$ )和变化间隔  $\Delta j$  并根据公式:  $Z_{0j} = (Z_{1j} + Z_{2j})/2$ ,  $\Delta j = (Z_{1j} - Z_{2j})/\gamma$  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 Code table of factors and levels for orthogonal experimental design

| 水平 | $X_1$ 加入量/g | $X_2$ 质量浓度/(mg/L) | $X_3$ 时间/h | $X_4$ pH | $X_5$ 温度/℃ |
|----|-------------|-------------------|------------|----------|------------|
| 2  | 0.9         | 50                | 6          | 7        | 70         |
| 1  | 0.7         | 40                | 5          | 6        | 60         |
| 0  | 0.5         | 30                | 4          | 5        | 50         |
| -1 | 0.3         | 20                | 3          | 4        | 40         |
| -2 | 0.1         | 10                | 2          | 3        | 30         |

#### 1.2.4 莴笋叶渣对重金属离子吸附率的测定

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

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

式中:  $C_0$  为吸附前重金属离子的初始浓度质量浓度/(mg/L);  $C_1$  为吸附后重金属离子的平衡质量浓度/(mg/L);  $V$  为重金属离子溶液体积/L;  $m$  为加入莴笋叶渣质量/g<sup>[16]</sup>。

#### 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 固液比对 $\text{Cu}^{2+}$ 吸附效果的影响

吸附剂投入量与金属溶液体积的比值称作固液比<sup>[17]</sup>。固液比实验条件:配制 7 份 100mL、30mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  溶液,分别加入 60 目莴笋叶渣 0.2、0.4、0.8、1.2、1.6、2.0g 和 3.0g,室温静置吸附 4h,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,并计算吸附率。

#### 1.2.7 莴笋叶渣与活性炭吸附能力的对比实验

配制 3 种不同初始质量浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液(10、30、50mg/L),每种质量浓度的溶液配 2 份,每份 50mL,溶液 pH 值为自然状态,加入的莴笋叶渣(60 目)与活性炭均为 0.5g,室温静置吸附 4h,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,对莴笋叶渣和活性炭在 3 种不同初始质量浓度的  $\text{Cu}^{2+}$  溶液中的吸附能力做对比<sup>[18]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 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 Quadratic orthogonal rotation combination design and results of the trials

| 试验号 | $X_1$ 加入量 | $X_2$ 质量浓度 | $X_3$ 时间 | $X_4$ pH | $X_5$ 温度 | $Y$ 吸附率/% |
|-----|-----------|------------|----------|----------|----------|-----------|
| 1   | 1         | 1          | 1        | 1        | 1        | 79.49438  |
| 2   | 1         | 1          | 1        | -1       | -1       | 85.39326  |
| 3   | 1         | 1          | -1       | 1        | -1       | 81.03933  |
| 4   | 1         | 1          | -1       | -1       | 1        | 80.33708  |
| 5   | 1         | -1         | 1        | 1        | -1       | 88.30549  |
| 6   | 1         | -1         | 1        | -1       | 1        | 85.91885  |
| 7   | 1         | -1         | -1       | 1        | 1        | 86.87351  |
| 8   | 1         | -1         | -1       | -1       | -1       | 89.02148  |
| 9   | -1        | 1          | 1        | 1        | -1       | 55.61798  |
| 10  | -1        | 1          | 1        | -1       | 1        | 38.48315  |

续表 2

| 试验号 | $X_1$ 加入量 | $X_2$ 质量浓度 | $X_3$ 时间 | $X_4$ pH | $X_5$ 温度 | $Y$ 吸附率/% |
|-----|-----------|------------|----------|----------|----------|-----------|
| 11  | -1        | 1          | -1       | 1        | 1        | 58.84831  |
| 12  | -1        | 1          | -1       | -1       | -1       | 44.24157  |
| 13  | -1        | -1         | 1        | 1        | 1        | 73.26969  |
| 14  | -1        | -1         | 1        | -1       | -1       | 68.49642  |
| 15  | -1        | -1         | -1       | 1        | -1       | 74.94033  |
| 16  | -1        | -1         | -1       | -1       | 1        | 65.87112  |
| 17  | -2        | 0          | 0        | 0        | 0        | 42.6087   |
| 18  | 2         | 0          | 0        | 0        | 0        | 85.91304  |
| 19  | 0         | -2         | 0        | 0        | 0        | 87.45763  |
| 20  | 0         | 2          | 0        | 0        | 0        | 59.81308  |
| 21  | 0         | 0          | -2       | 0        | 0        | 71.30435  |
| 22  | 0         | 0          | 2        | 0        | 0        | 77.3913   |
| 23  | 0         | 0          | 0        | -2       | 0        | 74.6087   |
| 24  | 0         | 0          | 0        | 2        | 0        | 80        |
| 25  | 0         | 0          | 0        | 0        | -2       | 58.43478  |
| 26  | 0         | 0          | 0        | 0        | 2        | 80.86957  |
| 27  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 88.17391  |
| 28  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 89.3913   |
| 29  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 81.04348  |
| 30  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 78.78261  |
| 31  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 82.08696  |
| 32  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 87.13043  |
| 33  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 85.73913  |
| 34  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 88.17391  |
| 35  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 88        |
| 36  | 0         | 0          | 0        | 0        | 0        | 90.43478  |

试验结果见表 2, 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, 建立加入量( $X_1$ )、质量浓度( $X_2$ )、时间( $X_3$ )、pH 值( $X_4$ )、温度( $X_5$ )对吸附率( $Y$ )的数学模型回归方程为:

$$Y = 85.45862 + 11.80098X_1 - 6.85546X_2 + 0.24918X_3 + 2.14203X_4 + 1.12124X_5 - 4.75315X_1^2 - 2.40953X_2^2 - 2.23141X_3^2 - 1.49228X_4^2 - 3.40533X_5^2 + 3.84570X_1X_2 + 0.61717X_1X_3 - 3.15888X_1X_4 - 0.26948X_1X_5 - 0.29760X_2X_3 + 0.77899X_2X_4 - 0.01867X_2X_5 - 0.23965X_3X_4 - 1.45840X_3X_5 + 0.94533X_4X_5$$

## 2.2 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, 失拟不显著, 即回归方程对试验点拟合较好。回归方程的显著性检验  $F_2 = 10.150 > F_{0.01(20,15)} = 3.37$ , 说明回归极显著, 即试验所选择 5 个因素对葛笋叶渣吸附重金属离子铜效果有显著影响。由此可知, 所得二次回归方程模型合适。

从表 3 各回归系数的显著水平  $P$  值可以看出, 加入量( $X_1$ )、质量浓度( $X_2$ )、pH( $X_4$ )对重金属离子铜吸附率( $Y$ )在  $\alpha = 0.01$  水平显著。5 个因素对铜吸附率( $Y$ )效果影响大小顺序为: 加入量 > 质量浓度 > pH 值 > 温度 > 时间。

表 3 二次正交旋转组合试验结果方差分析

Table 3 Analysis of variance of results of quadratic orthogonal rotation combination trials

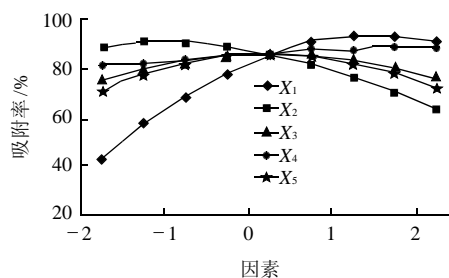
| 变异来源     | SS        | df | MS        | F 值          | P 值     |
|----------|-----------|----|-----------|--------------|---------|
| $X_1$    | 3342.3145 | 1  | 3342.3145 | 103.01457    | 0.00001 |
| $X_2$    | 1127.9344 | 1  | 1127.9344 | 34.76444     | 0.00003 |
| $X_3$    | 1.4902    | 1  | 1.4902    | 0.04593      | 0.83319 |
| $X_4$    | 110.1189  | 1  | 110.1189  | 3.39401      | 0.08529 |
| $X_5$    | 30.1724   | 1  | 30.1724   | 0.92995      | 0.35017 |
| $X_1^2$  | 722.9583  | 1  | 722.9583  | 22.28253     | 0.00027 |
| $X_2^2$  | 185.7867  | 1  | 185.7867  | 5.72619      | 0.03024 |
| $X_3^2$  | 159.3344  | 1  | 159.3344  | 4.9109       | 0.04257 |
| $X_4^2$  | 71.2609   | 1  | 71.2609   | 2.19636      | 0.15904 |
| $X_5^2$  | 371.0796  | 1  | 371.0796  | 11.43717     | 0.00411 |
| $X_1X_2$ | 236.6311  | 1  | 236.6311  | 7.29328      | 0.01644 |
| $X_1X_3$ | 6.0944    | 1  | 6.0944    | 0.18784      | 0.67089 |
| $X_1X_4$ | 159.656   | 1  | 159.656   | 4.92081      | 0.04239 |
| $X_1X_5$ | 1.1619    | 1  | 1.1619    | 0.03581      | 0.85244 |
| $X_2X_3$ | 1.417     | 1  | 1.417     | 0.04367      | 0.83727 |
| $X_2X_4$ | 9.7091    | 1  | 9.7091    | 0.29925      | 0.5924  |
| $X_2X_5$ | 0.0056    | 1  | 0.0056    | 0.00017      | 0.98971 |
| $X_3X_4$ | 0.9189    | 1  | 0.9189    | 0.02832      | 0.8686  |
| $X_3X_5$ | 34.0308   | 1  | 34.0308   | 1.04888      | 0.322   |
| $X_4X_5$ | 14.2984   | 1  | 14.2984   | 0.4407       | 0.51686 |
| 交互作用     | 6586.3736 | 20 | 329.3187  | $F_2=10.150$ | 0       |
| 残差       | 486.676   | 15 | 32.4451   |              |         |
| 模型       | 348.8491  | 6  | 58.1415   | $F_1=3.797$  | 0.01677 |
| 误差       | 137.8268  | 9  | 15.3141   |              |         |
| 总和       | 7073.0496 | 35 |           |              |         |

剔除回归方程中不显著因素, 得到简化后的回归方程为:  $Y = 85.45862 + 11.80098X_1 - 6.85546X_2 + 2.14203X_4 - 4.75315X_1^2 - 2.40953X_2^2 - 2.23141X_3^2 - 3.40533X_5^2 + 3.84570X_1X_2 - 3.15888X_1X_4$ 。

葛笋叶渣对重金属离子铜的吸附率与加入量、质量浓度、时间、pH 值、温度的相关指数  $R^2 = \text{回归平方和} / \text{总平方和} = 93.12\%$ , 而其他因素的影响和误差占 6.88%。

## 2.3 单因素效应分析

用降维法将其他因素固定在零水平条件下, 分别研究加入量( $X_1$ )、质量浓度( $X_2$ )、时间( $X_3$ )、pH 值( $X_4$ )、温度( $X_5$ )对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附率( $Y$ )的影响(图 1)。

图 1 各因素对  $\text{Cu}^{2+}$  吸附率的影响Fig.1 Effect of each factor on  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption rate

如图1所示, 吸附率随质量浓度增加呈下降趋势, 明显表现为负相关; 吸附率随pH值增加相应提高, 明显表现为正相关。加入量、时间、温度与吸附率呈抛物线关系, 表明3因素均存在一个合理范围, 即对莴笋叶渣吸附重金属 $\text{Cu}^{2+}$ 都呈先升后降趋势。

## 2.4 影响因素交互作用响应面分析

通过对回归方程分析可知,  $X_1X_2$ 、 $X_1X_4$ 影响极显著, 响应面图见图2、3。

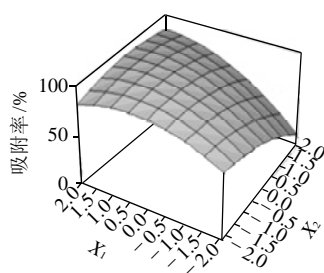


图2 加入量与质量浓度的交互作用响应面分析

Fig.2 Response surface plots of the interactive effects of addition amount and concentration on  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption

由图2可知, 吸附率并非随加入量及质量浓度的增加而增加, 而是随加入量的增加先增后降, 而质量浓度越高吸附率越低, 加入量0.5g、质量浓度20mg/L时, 达到最大吸附率93.4089%。表明二者互作时, 质量浓度影响较大。

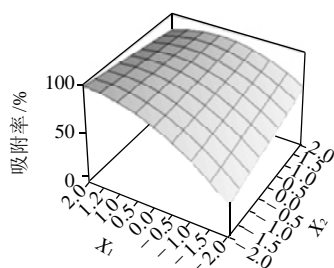


图3 加入量与pH值交互作用响应面分析

Fig.3 Response surface plots of the interactive effects of addition amount and pH on  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption

由图3可知, 吸附率随加入量及pH值的增加而增加, 在加入量0.9g、pH3时有最大吸附率98.39945%, 表明2者互作时, 加入量与pH值影响均较大, 且二者在影响程度上有互相增强的趋势。

## 2.5 莴笋渣对重金属离子铜吸附的最佳参数组合

通过计算机模拟寻优得出莴笋叶渣对重金属离子铜吸附的优化组合为: 加入量在2水平(0.9g), 质量浓度0水平(30mg/L)、时间0水平(5h)、pH值-2水平(3)、

温度在0水平(40℃), 在此条件下莴笋叶渣对铜吸附率为98.40%。按照最佳参数对优化结果进行验证, 其实测吸附率97.96%, 与理论值98.40%较接近, 进一步验证了数学回归模型的合理性。

## 2.6 固液比对吸附效果的影响

为提高莴笋叶渣的利用率, 研究了莴笋叶渣用量和金属溶液体积之间的固液比, 结果如图4所示, 莴笋叶渣用量的增多导致固液比增大, 吸附率也增大, 当固液比大于12g/L后, 吸附率增大趋势放缓且提高幅度很小, 由此可知对于30mg/L  $\text{Cu}^{2+}$ 溶液, 莴笋叶渣吸附时的最佳固液比为12g/L, 此时吸附率为82.28%。

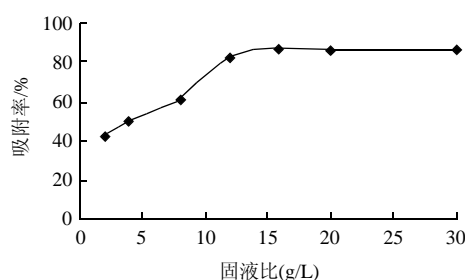


图4 莴笋叶渣吸附 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液的固液比

Fig.4 Effect of solid to liquid ratio on  $\text{Cu}^{2+}$  adsorption by residue of asparagus lettuce leaf

## 2.7 莴笋叶渣与活性炭的吸附能力对比

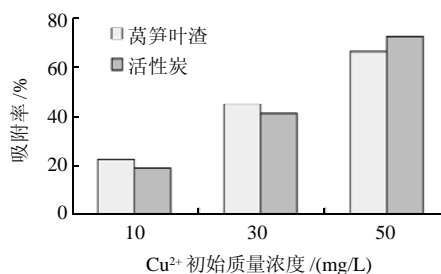


图5 莴笋叶渣与活性炭吸附能力比较

Fig.5 Comparison between asparagus lettuce leaf residue and activated carbon adsorption capacity

如图5所示,  $\text{Cu}^{2+}$ 溶液初始质量浓度为10mg/L和30mg/L时, 莴笋叶渣的吸附效果略高于活性炭;  $\text{Cu}^{2+}$ 初始质量浓度为50mg/L时, 活性炭相对优于莴笋叶渣。可见对于中低质量浓度的 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液, 莴笋叶渣的吸附效果稍好于活性炭; 而对于高质量浓度的 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液, 活性炭的吸附效果优于莴笋叶渣。

原因可能为两者的吸附机理不同。活性炭的特性决定了其对 $\text{Cu}^{2+}$ 的吸附属物理吸附, 莴笋叶渣主要成分是纤维素<sup>[19-20]</sup>, 纤维素本身具有很强的重金属整合能力<sup>[21-23]</sup>, 尤其是本实验所用莴笋叶渣经过酸碱处理, 理论上具有

更强的重金属螯合能力<sup>[24]</sup>。根据莴笋叶渣成分特性及图5所示结果,结合前人研究<sup>[25]</sup>,推测莴笋叶渣对 $\text{Cu}^{2+}$ 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5结果分析如下:当 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液初始质量浓度较低时,莴笋叶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 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液初始质量浓度比较高时,莴笋叶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,所以吸附效果没活性炭好。

### 3 讨论与结论

3.1 莴笋叶渣对重金属离子铜吸附的回归数学模型为: $Y = 85.45862 + 11.80098X_1 - 6.85546X_2 + 0.24918X_3 + 2.14203X_4 + 1.12124X_5 - 4.75315X_1^2 - 2.40953X_2^2 - 2.23141X_3^2 - 1.49228X_4^2 - 3.40533X_5^2 + 3.84570X_1X_2 + 0.61717X_1X_3 - 3.15888X_1X_4 - 0.26948X_1X_5 - 0.29760X_2X_3 + 0.77899X_2X_4 - 0.01867X_2X_5 - 0.23965X_3X_4 - 1.45840X_3X_5 + 0.94533X_4X_5$ 。通过分析此模型在本实验范围内能较准确预测莴笋叶渣对重金属离子铜的吸附率。

3.2 从回归模型可知,当加入量0.9g、 $\text{Cu}^{2+}$ 质量浓度30mg/L、时间5h、pH3、温度40℃时,莴笋叶渣对 $\text{Cu}^{2+}$ 的最高吸附率为98.40%。据此条件进行验证,其实测值97.96%,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 对于30mg/L  $\text{Cu}^{2+}$ 溶液,莴笋叶渣为吸附剂时的最佳固液比为12g/L;对于中低质量浓度的 $\text{Cu}^{2+}$ 溶液,莴笋叶渣的吸附效果好于活性炭。

可见该模型较好地反映出重金属离子铜的吸附条件,利用莴笋叶渣吸附重金属离子铜不仅提高了吸附率,而且也提高了莴笋叶渣的利用价值,本实验为开发莴笋叶渣这种无残留、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] KING P, ANURADHA K, BEENA L S, et al. Biosorption of zinc from aqueous solution using *Azadirachta indica* bark: equilibrium and

kinetic studies[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,152(1): 324-329.

- [4] SRIVASTAVA V C, MALL I D, MISHRA I M. Adsorption of toxic metal ions onto activated carbon: study of sorption behavior through characterization and kinetics[J]. Chemical Engineering and Processing, 2008, 47(8): 1269-1280.
- [5] GHATA S, CHAPHEKAR S B. *Plagiochasma appendiculatum* as a biotest for water quality assessment[J]. Environmental Pollution, 2000, 108(2): 173-181.
- [6] 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.
- [7] 陈静生,周家义. 中国水环境金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 3-5.
- [8] 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.
- [9] KAEWSARN P. Biosorption of copper(II) from aqueous solutions by pretreated biomass of marine alga *Padina* sp.[J]. Chemosphere, 2002, 47(10): 1081-1085.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] MONDAL M K. Removal of Pb(II) from aqueous solution by adsorption using activated tea waste[J]. Korean J Chem Eng, 2010, 27(1): 144-151.
- [17] 卢丹丹. 以纤维素类生物废弃物一草为基质的新型吸附材料的制备及其对吸附重金属Pb(II)和Cd(II)的应用研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 杨贤庆,李来好,戚勃. 4种海藻膳食纤维对 $\text{Cd}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^{2+}$ 的吸附作用[J]. 中国水产科学, 2007, 14(1): 132-138.
- [24] 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.
- [25] 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.