

肖婉露, 程金凤, 郭瑞军, 等. 四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)对 Cd(II) 的吸附效率及吸附动力学研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1595–1601.

XIAO Wan-lu, CHENG Jin-feng, GUO Rui-jun, et al. Efficiency and kinetics of Cd(II) adsorption by *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(8): 1595–1601.

四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)对 Cd(II) 的吸附效率及吸附动力学研究

肖婉露¹, 程金凤^{1*}, 郭瑞军¹, 赵庆春², 常朝阳¹, 姜在民¹

(1.西北农林科技大学生命科学学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100))

摘 要:研究了不同初始 pH 值(3、4、5、6、7)和不同初始金属镉浓度(0.5、5、10、20 mg·L⁻¹)条件下, 四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)干藻粉对重金属镉吸附效率的变化, 并采用伪一阶动力学方程、伪二阶动力学方程和 Elovich 动力学方程对实验数据进行了拟合。结果表明:在不同的初始镉离子浓度和不同的初始 pH 值条件下, 随着时间推移, 吸附效率均呈现先上升后稳定的趋势, 在约 60 min 时吸附达到平衡; 随着初始 pH 值的升高, 平衡时刻四尾栅藻对镉的吸附效率呈现先上升后下降的趋势, 初始 pH 值为 6 时最大; 随着初始镉浓度从 0.5 mg·L⁻¹ 上升到 20 mg·L⁻¹, 平衡时刻吸附效率也呈现先上升后下降的趋势, 在 10 mg·L⁻¹ 吸附效率达到最大值 72.93%。四尾栅藻干藻粉对镉的吸附动力学符合伪二阶动力学方程, 表明四尾栅藻的吸附过程是表面的、持续的过程。

关键词:四尾栅藻; 镉; 吸附; 动力学

中图分类号: X52 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)08-1595-07 doi:10.11654/jaes.2016-0179

Efficiency and kinetics of Cd(II) adsorption by *Scenedesmus quadricauda*

XIAO Wan-lu¹, CHENG Jin-feng^{1*}, GUO Rui-jun¹, ZHAO Qing-chun², CHANG Zhao-yang¹, JIANG Zai-min¹

(1.College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Cadmium(Cd) is an important environmental pollutant. Removal of Cd by bi-adsorption is receiving extensive attention. In this study, dry powder of green microalgae *Scenedesmus quadricauda* was used as a biosorbent to remove Cd(II) from aqueous solution. Efficiency and kinetics of Cd(II) biosorption on *S. quadricauda* were investigated by using pseudo-first-order, pseudo-second-order and Elovich kinetic models to fit the experimental data. Results showed that the adsorption efficiency increased at the beginning with a rapid metal removal, and then reached an equilibrium after about 60 min under different initial pH values and different initial Cd(II) concentrations. With increases in pH, the adsorption efficiency of Cd(II) by *S. quadricauda* increased at first, and then decreased, with the maximum efficiency occurred at initial pH of 6. Similarly, with increasing the initial Cd(II) concentration from 0.5 mg·L⁻¹ to 20 mg·L⁻¹, the efficiency of Cd(II) adsorption first increased and then decreased, with the maximum biosorption efficiency of 72.93%. The kinetics of Cd(II) adsorption on *S. quadricauda* could be described by the pseudo-second-order equation, indicating that the Cd(II) adsorption by *S. quadricauda* powder was surfacial and continuous process.

Keywords: *Scenedesmus quadricauda*; cadmium; absorption; kinetics

收稿日期: 2016-02-08

基金项目: 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金(2014YB038); 西北农林科技大学 2015 年国家级“大学生创新创业训练计划项目”(201510712028); 西北农林科技大学 2015 年“大学生创新创业训练计划”校重点项目(201510712157)

作者简介: 肖婉露(1990—), 女, 河南平顶山人, 在读硕士, 主要从事植物学研究。E-mail: Xwanlu@163.com

* 通信作者: 程金凤 E-mail: chengjinfeng@nwsuaf.edu.cn

镉是一种典型的环境重金属污染物,在环境中化学活性很强,容易迁移进入食物链而危害人类健康^[1]。但是工业生产中不可避免有含镉的废水排放,所以如何有效去除工业废水中的镉一直是人们研究的热点。目前常用的吸附方法有磁性吸附法、离子液体萃取法、氧化还原法、电化学法、化学沉淀法、反渗透法等^[2-3]。但是这些传统的方法却有吸附效率低、成本高、设备和检测系统造价昂贵等缺点。所以近年来,生物吸附法,即用生物体活细胞或者死细胞作为一种吸附剂引起了人们的广泛关注。国内外的许多研究显示,很多种藻类(如小球藻、螺旋藻、铜绿微囊藻等)对重金属均有很高的吸附效率^[4-5]。Metha等^[6]指出:藻类对重金属的吸附能力接近甚至高于化学吸附剂。所以对于污水重金属吸附和修复来讲藻类具有相当大的潜能,是工业污水处理的一个环保而且高效的选择。微藻对重金属的吸附是一个复杂的物化与生化过程,是多种机理共同协作的结果,主要包括络合机理和离子交换机理。藻类富含生化和矿物组分,尤其是一些官能团,如-OH、-COOH、-SH、-PO₃O₂和-NH₂等在吸附过程中发挥很大的作用。初始pH值、藻浓度、初始金属离子浓度、温度等因素的变化都会影响微藻的吸附进程^[7-9]。所以,探究其吸附的最佳条件对于工业生产应用具有很大意义。

四尾栅藻是一种常见的绿藻,具有分布广、生长快、易大量培养、方便收集等特点,是一种很有应用价值的生物吸附剂。目前有关藻类作为生物吸附剂吸附重金属的研究结果多数显示:同种条件下,死藻的吸附效率要略高或者远高于活藻^[10-13]。此外,工业排放污水中其他生物毒性物质含量偏高,pH波动范围太大,容易超出活藻的耐受能力,而且污水中营养物质匮乏,藻类活性难以维持。支田田等^[14]指出,相对于活藻来说,死亡藻体则更适合制备成吸附剂,用于工业重金属废水的处理。本文探究了四尾栅藻干藻粉作为吸附剂对重金属镉的吸附作用,研究了初始pH值、初始金属离子浓度两个参数对吸附效率的影响,并对一定条件下吸附平衡过程的吸附动力学进行了分析,为四尾栅藻应用于工业污水处理提供了一定的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料和设备

四尾栅藻,藻种分离于西北农林科技大学南校区池塘。原子吸收分光光度计,日立Z-2000偏振塞曼原子吸收分光光度计。

1.2 实验设计

1.2.1 干藻粉的制备

参照Zhang等^[15]的方法,将藻接种于内含5 LBG11培养基的三角瓶并置于光照培养箱,在25±1℃,光暗比12h:12h,光强4000 lx条件下培养。参照Paksirajan等^[16]和Bayramoglu等^[17]的方法,培养期间,用紫外-可见分光光度计对藻密度进行检测,在藻生长到稳定期时用3000×g离心10 min进行浓缩,并用去离子水洗3次,然后110℃杀青15 min,60℃烘干至恒重收集,所得干藻粉冷冻干燥保存供吸附实验所用。

1.2.2 金属离子溶液的配制

所有器皿在使用前均用1:1的浓盐酸浸泡24 h。根据参考文献[18]以及我们预实验的结果,共设置了4个初始金属离子浓度和5个初始pH值梯度。镉离子的标准溶液为10 g·L⁻¹的硫酸镉溶液,用去离子水依次稀释为20、10、5、0.5 mg·L⁻¹。用0.01 mol·L⁻¹的HNO₃或NaOH调节初始pH值为3、4、5、6、7,实验过程中不控制。每个处理做3个平行。

1.2.3 吸附试验

参考Mirghaffari等^[19]的方法,取配置好的硫酸镉溶液80 mL置于锥形瓶中,于28℃、180 r·min⁻¹的摇床上进行吸附实验。每个样品中加入藻粉量均为200 mg·L⁻¹。从加入藻粉开始计时,分别在第2、5、10、30、60、90、120 min取出液体5 mL,在2500×g的条件下离心3 min,保留上清液3 mL。镉离子含量用原子分光光度计进行检测。四尾栅藻的吸附效率用公式(1)确定:

$$R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 表示小球藻的吸附效率; C_0 表示吸附前重金属镉的浓度,mg·L⁻¹; C 表示吸附后重金属镉的浓度,mg·L⁻¹。

1.2.4 动力学研究

参考Basha等^[20]和Montazer-Rahmati等^[21]的方法,在藻粉接种量为200 mg·L⁻¹、金属离子浓度为20 mg·L⁻¹、初始pH为6、温度28℃的条件下进行吸附实验。分别在第2、5、10、30、60、90、120 min取上清液。对样品在不同时刻的吸附量进行分析,采用公式(2)确定单位藻量吸附的金属量 q_t :

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{m} \quad (2)$$

式中: q_t 表示在 t 时刻的吸附容量,mg·g⁻¹; C_0 表示初始金属浓度,mg·L⁻¹; C_t 表示在 t 时刻溶液中的金属离子浓度,mg·L⁻¹; V 表示溶液体积,L; m 表示四尾栅

藻的质量, g。

采用伪一阶动力学模型(3)、伪二阶动力学模型(4)和 Elovich 动力学模型(5)进行动力学分析,模型分别如下:

$$\lg(q_e - q_t) = \lg q_e - \frac{K_1}{2.303} t \quad (3)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta}\right) \ln t \quad (5)$$

式中: q_e 为吸附平衡时吸附的重金属量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; q_t 为在 t 时间时吸附的重金属量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$; K_1 为伪一级反应速率常数, min^{-1} ; K_2 为伪二级反应速率常数, $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; α 为初始吸附速率常数, $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$; β 为解吸速率常数, $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。

1.3 数据处理与分析

所有的处理设置 3 个重复,所得数据均以平均值表示,利用 SPSS 19 统计软件采用全因子模型对方差进行单变量分析,以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平。此外对实验结果进行单因素方差分析(ANOVA),并用 LSD 法对组间差异进行比较,以 $P < 0.05$ 作为差异显

著水平。

2 结果与分析

2.1 初始 pH 值对四尾栅藻干藻粉吸附效率的影响

不同初始 pH 条件下四尾栅藻干藻粉对镉的吸附进程如图 1, 其中 a、b、c、d 分别是初始镉浓度为 0.5 、 5 、 10 、 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 不同初始 pH 条件下四尾栅藻对镉离子的吸附率随着时间的变化。可以很明显的看出, 四尾栅藻干藻粉对溶液中金属镉的吸附在前 2 min 内是非常高效的, 2~60 min 吸附率还有所上升, 但是幅度非常小。其中图 1a 显示, 初始 pH 为 6 时, 吸附在第 30 min 时达到平衡, 其他各 pH 条件下基本都是在第 60 min 时达到稳定。由图 1a、图 1b、图 1c、图 1d 中均能看到在初始 pH 为 3 时吸附率明显低于其他初始 pH 值的吸附率。在 4 个初始金属离子浓度条件下, 随着初始 pH 值的增大, 四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附率均呈现出先上升后下降的趋势, 而且均是在初始 pH 为 6 的条件下, 平衡时刻的吸附率达到最大。初始镉浓度为 0.5 、 5 、 10 、 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 吸附率随着初始 pH 值的变化范围分别是 $18.40\% \sim 66.67\%$ 、

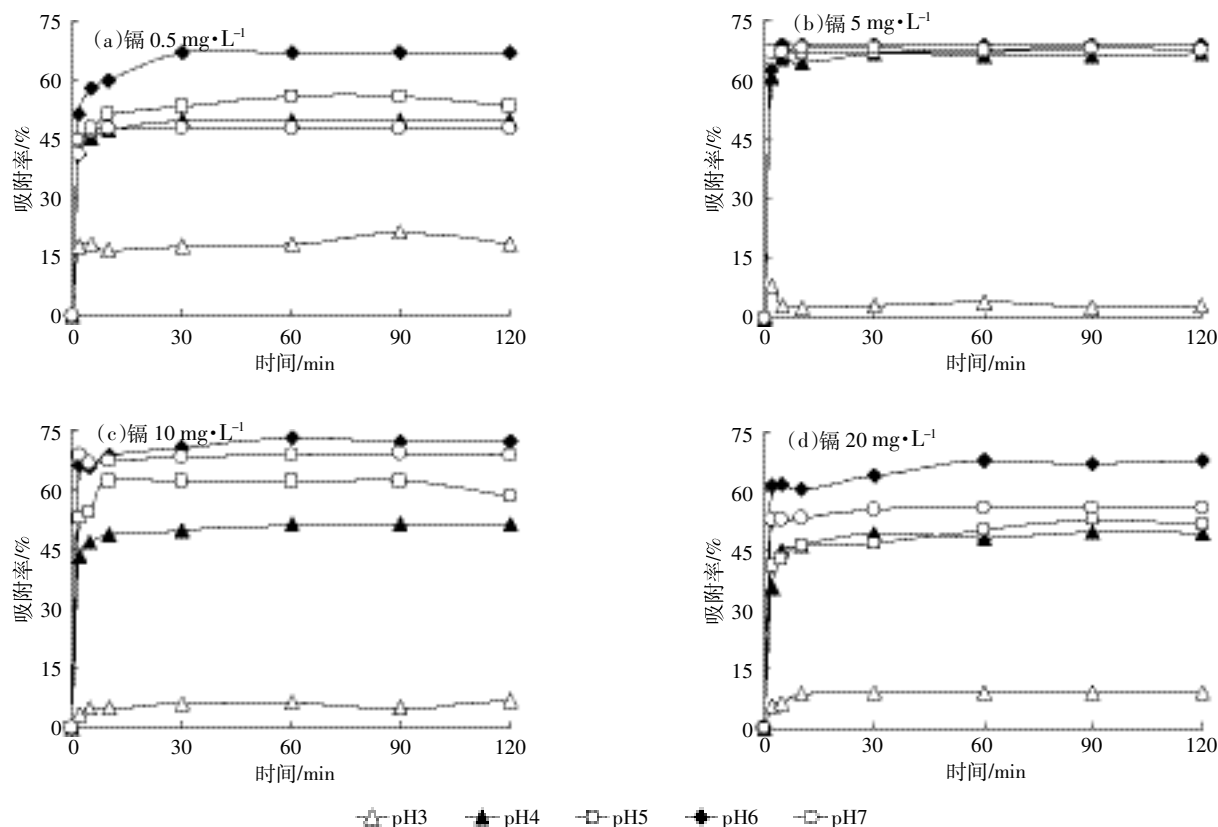


图 1 初始 pH 值对四尾栅藻干藻粉吸附率的影响

Figure 1 Effect of initial pH on Cd(II) adsorption from synthetic solution by dry *S. quadricauda* biomass

3.97%~68.68%、6.5%~72.93%、9.09%~67.57%。

2.2 初始镉离子浓度对四尾栅藻干藻粉吸附效率的影响

根据不同初始 pH 值对吸附效率影响的结果,得出最适的初始 pH 值为 6,平衡时刻为 60 min。所以在初始 pH 值为 6 的条件下,设置了 0.5、5、10、20 mg·L⁻¹ 共 4 个浓度的硫酸镉溶液进行吸附实验。通过检测第 60 min 时的吸附效率研究不同金属离子浓度对吸附的影响。如图 2 所示,在初始 pH 为 6 的条件下,0.5、5、10、20 mg·L⁻¹ 的硫酸镉溶液中在吸附达到平衡时刻,四尾栅藻干藻粉的吸附率分别为 66.67%、68.68%、72.93%、67.57%。随着初始金属浓度的增加,四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附率呈现出先上升后下降的趋势。

2.3 初始 pH 值对四尾栅藻干藻粉吸附镉离子容量的影响

初始镉离子浓度为 0.5、5、10、20 mg·L⁻¹ 时,不同的初始 pH 值条件下,四尾栅藻对镉离子的吸附容量随着时间的变化过程如图 3 所示。在 4 个不同初始浓度条件下,吸附容量随着初始 pH 的上升呈现出先上升再下降的趋势,均在初始 pH 值为 6 的时候,吸附

容量达到最大值。初始镉浓度为 0.5、5、10、20 mg·L⁻¹ 时,吸附容量随着初始 pH 值的变化范围分别是 0.14~0.5、0.3~5.64、1.08~12.35、3.16~22.92 mg·g⁻¹。

2.4 初始金属离子浓度对四尾栅藻干藻粉吸附镉离子容量的影响

在初始 pH 为 6 的条件下,平衡时刻 0.5、5、10、

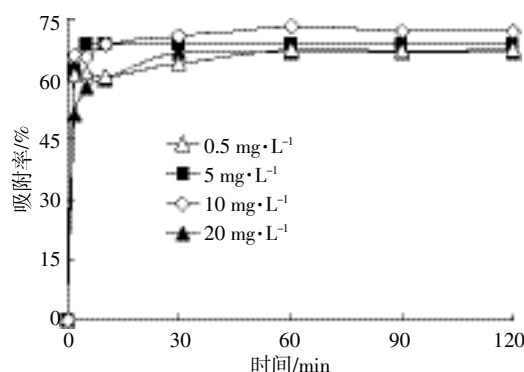


图 2 初始镉浓度对四尾栅藻干藻粉吸附镉离子吸附率的影响

Figure 2 Effect of initial metal concentrations on Cd(II)

adsorption from synthetic solutions by dry *S. quadricauda* biomass

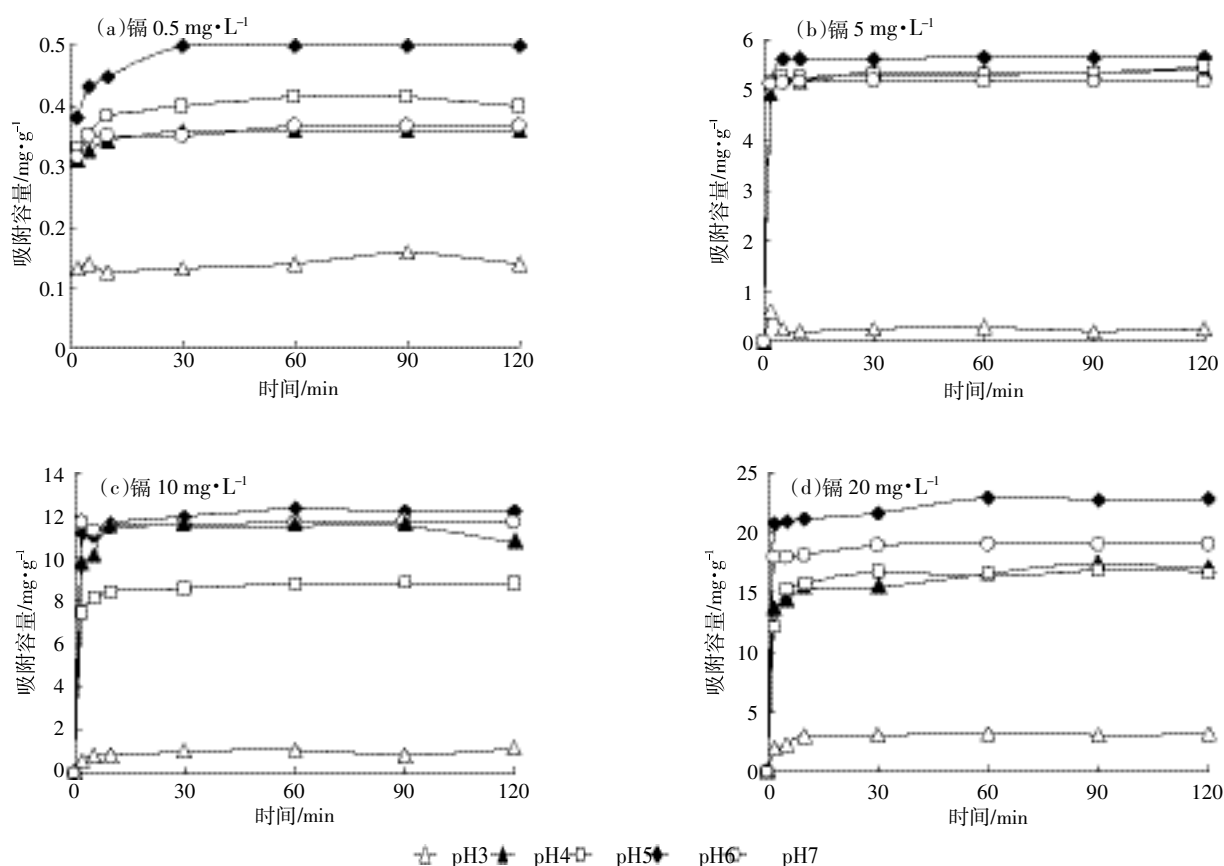


图 3 初始 pH 值对四尾栅藻干藻粉吸附镉离子容量的影响

Figure 3 Effect of initial pH on q_e of Cd(II) from synthetic solution by dry *S. quadricauda* biomass

20 mg·L⁻¹ 的硫酸镉溶液中四尾栅藻干藻粉的吸附容量分别为 0.5、5.64、12.35、22.92 mg·g⁻¹。如图 4 所示,随着初始镉离子浓度的增加,平衡时刻四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附容量呈逐渐上升的趋势。

2.5 吸附过程的动力学研究结果

在藻粉接种量为 200 mg·L⁻¹, 金属离子浓度为 20 mg·L⁻¹, 初始 pH 为 6, 温度为 28 ℃ 的条件下, 对四尾栅藻干藻粉随着时间变化对镉离子吸附容量的变化过程进行了动力学分析。图 5a 是伪一阶动力学模型拟合的结果, 描述了 lg(*q_e* - *q_t*) 随着时间的变化; 图 5b 是伪二阶动力学模型拟合的结果, 描述的是 *t/q_t* 随

着时间的变化; 图 5c 是 Elovich 动力学模型拟合的结果, 描述的是 *q_t* 随着 lnt 的变化。

结果中的点与所拟合的动力学模型所得直线决定系数 *R*² 的值越大, 说明吸附过程与其越符合。表 1 列出了三种不同模型的关键参数值, 其中伪二阶动力学模型的 *R*² (0.999) 远大于伪一阶动力学模型 (0.702) 和 Elovich 模型 (0.828)。而且, 根据此模型得到的理论平衡时刻的吸附容量 (*q_e*, 22.88 mg·g⁻¹) 最接近实验所得吸附平衡时刻的吸附容量 (*q_{exp}*, 22.92 mg·g⁻¹), 说明四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附过程最符合伪二阶动力学模型。

3 讨论

根据实验结果可以得出, 本研究中的四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附主要在前 2 min 内完成, 2~60 min 吸附效率的增加非常微小。这是由于本文中所用材料为不具有活性的干藻粉, 没有新陈代谢的能力, 镉离子和吸附剂的结合主要是其与细胞表面以及细胞内部暴露出来的官能团的结合。这个阶段主要是藻体细胞表面的吸附, 而且此吸附过程是一个动态平衡过程, 被吸附的离子还可以被其他离子解吸下来^[22]。

本文对初始 pH 值和初始金属离子浓度对吸附过程的影响均进行了研究, 最适初始 pH 为 6。初始金属离子浓度确定的条件下, 随着初始 pH 值从 3 到 7

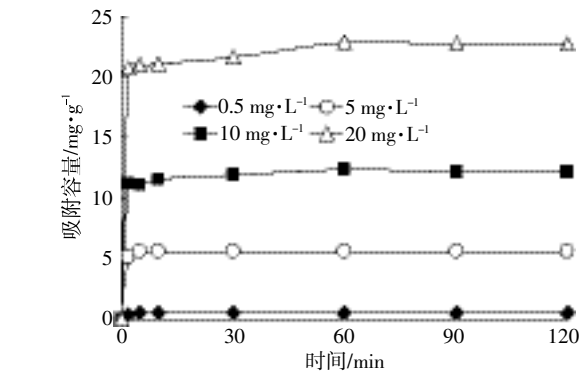


图 4 初始镉离子浓度对四尾栅藻干藻粉吸附容量的影响
Figure 4 Effect of initial metal concentration on *q_e* of Cd(II) from synthetic solution by dry *S. quadricauda* biomass

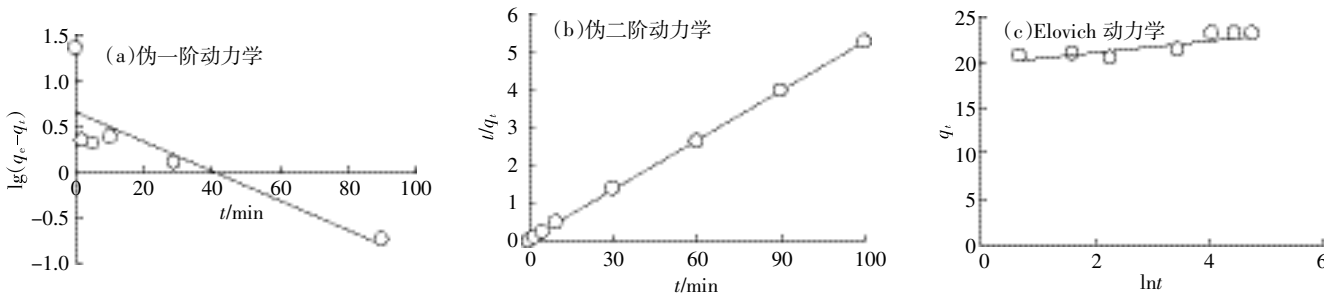


图 5 四尾栅藻干藻粉对镉吸附过程的伪一阶动力学、伪二阶动力学和 Elovich 动力学模型图
Figure 5 Kinetic models of pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Elovich models for biosorption of Cd(II) from synthetic solution using dry *S. quadricauda* biomass

表 1 四尾栅藻干藻粉吸附金属镉的动力学模型参数

Table 1 Kinetic constant parameters for Cd biosorption from synthetic solution by dry *S. quadricauda* biomass

伪一阶 Pseudo-first-order			伪二阶 Pseudo-second-order			Elovich			<i>q_{exp}</i> /mg·g ⁻¹
<i>q_e</i> /mg·g ⁻¹	<i>K₁</i> /min ⁻¹	<i>R</i> ²	<i>q_e</i> /mg·g ⁻¹	<i>K₂</i> /g·mg ⁻¹ ·min ⁻¹	<i>R</i> ²	<i>α</i> /mg·g ⁻¹ ·min ⁻¹	<i>β</i> /g·mg ⁻¹	<i>R</i> ²	
4.596	0.04	0.702	22.88	0.08	0.999	5.88×10 ¹³	0.61	0.828	22.92

注:*q_{exp}* 为实验测得的 *q_e*。
Note: *q_{exp}* indicates experimental *q_e*.

的升高,吸附效率和吸附容量均出现先上升后下降的趋势,与 Bayramoglu 等^[17]在 2011 以及 Mirghaffari 等^[19]在 2015 所报道的 pH 值对四尾栅藻对镉离子吸附过程的影响结果相一致。本文测得的最大吸附率为 72.93%,最大吸附容量为 $22.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。而 Bayramoglu 等^[17]研究结果的最适 pH 为 5~6,最大容量为 $0.68 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$;Mirghaffari 等^[19]研究结果的最适 pH 为 5,最大吸附率为 66%,最大吸附容量为 $36.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。最适 pH 略有差异,可能与藻源的不同有关,因为不同的自然生活环境下四尾栅藻的细胞结构和组分含量也有轻微的差别。初始 pH 值影响了溶液中金属的溶解度,也影响了四尾栅藻干藻粉所含的官能团的活性以及其对金属离子的竞争力。由于很多官能团(如-OH)为酸性,在酸性溶液中 H^+ 会和金属离子竞争细胞表面的结合位点^[6,8]。初始金属离子浓度提供了很重要的驱动力作用,从而克服金属离子在水和固体表面传递时巨大的传质阻力^[23]。随着初始金属离子浓度的增加,吸附率先上升后下降,而吸附容量一直上升,表明虽然四尾栅藻整体的吸附率下降,但是单位重量的四尾栅藻干藻粉对镉离子还有很大的吸附空间。据此,在实际的工业废水处理中,要根据实际的金属离子浓度来选择合适的藻浓度,以达到效果最好而又不浪费的目的。

伪一阶动力学模型基于假定吸附受到扩散步骤控制,吸附速率正比于吸附量与 t 时刻吸附量的差值;伪二阶模型是基于假定吸附速率受化学吸附机理的控制,这种控制涉及到吸附剂与吸附质之间共用电子和电子转移^[24],Elovich 模型最初被用于描述固体对气体的吸附过程,目前也开始应用于对污水吸附过程的描述^[25]。通过三个动力学模型对四尾栅藻干藻粉的吸附过程进行拟合,得出伪二阶动力学模型最符合其吸附过程,说明了四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附过程是表面的、持续的过程。这对于将其应用于工业中污水处理的条件控制有很重要的参考意义。

4 结论

四尾栅藻干藻粉对镉离子的吸附过程是一个快速吸附过程。吸附在前 2 min 快速进行,之后吸附率仍有缓慢升高,进行到约 60 min 的时候达到吸附平衡。最大吸附效率为 72.93%。随着初始 pH 值从 3 到 7 的升高,吸附效率呈现出先上升再下降的趋势,最适初始 pH 值为 6。随着硫酸镉浓度从 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,吸附率呈现出先上升后下降的趋势,

吸附容量呈现一直上升的趋势。吸附过程符合伪二阶动力学模型。

参考文献:

- [1] 沈 倩,党秀丽. 土壤重金属镉污染及其修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(15):92-94.
SHEN Qian, DANG Xiu-li. Review of soil heavy metal cadmium pollution and remediation technology[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(15):92-94.
- [2] 张亚南,骆碧君,武海虹,等. 重金属去除方法的研究进展[J]. 盐业与化工, 2015, 44(10):1-6.
ZHANG Ya-nan, LUO Bi-jun, WU Hai-hong, et al. Research development of removal methods for heavy metal ions[J]. *Journal of Salt and Chemical Industry*, 2015, 44(10):1-6.
- [3] 王建龙,陈 灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4):673-701.
WANG Jian-long, CHEN Can. Research advances in heavy metal removal by biosorption[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4):673-701.
- [4] Jalali R, Ghafourian H, Asef Y, et al. Removal and recovery of lead using nonliving biomass of marine algae[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 92(3):253-262.
- [5] Dwivedi S, Srivastava S, Mishra S, et al. Characterization of native microalgal strains for their chromium bioaccumulation potential; Phytoplankton response in polluted habitats[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(s1-3):95-101.
- [6] Metha S K, Gaur J P. Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: Progress and prospects[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2005, 25(3):113-152.
- [7] 杨 芬. 藻类对重金属的生物吸附技术研究及其进展[J]. 曲靖师范学院学报, 2002, 21(3):47-49.
YANG Fen. Biological adsorption technique study and progress of the algae on heavy metal[J]. *Journal of Qujing Teachers College*, 2002, 21(3):47-49.
- [8] Arief V O, Trilestari K, Sunarso J, et al. Recent progress on biosorption of heavy metals from liquids using low cost biosorbents; Characterization, biosorption parameters and mechanism studies[J]. *Clean Soil Air Water*, 2008, 36(12):937-962.
- [9] Mata Y N, Ballester A, González F, et al. Characterization of the biosorption of cadmium, lead and copper with the brown alga *Fucus vesiculosus*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 158(2/3):316-323.
- [10] 骆巧琦,陈长平,梁君荣,等. 利用藻类去除电镀废水中重金属的实验研究[J]. 厦门大学学报:自然科学版, 2006, 45(B5):277-280.
LUO Qiao-qi, CHEN Chang-ping, LIANG Jun-rong, et al. The study on heavy metals removal from the plating industrial waste water by algae[J]. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2006, 45(B5):277-280.
- [11] 李秋华,白慧卿,彭 滨. 螺旋藻生物富集镍的影响因素研究[J]. 广州化学, 2007, 32(3):26-30.
LI Qiu-hua, BAI Hui-qing, PENG Bin. Influencing factors on Ni

- bioaccumulation by *Spirulina*[J]. *Guangzhou Chemistry*, 2007, 32(3): 26–30.
- [12] Li H R, Du Z H, Liang J L, et al. Optimization of bioaccumulation by *Synechococcus*[J]. *China Particuology*, 2006, 4(2): 77–79.
- [13] 杜竹玮, 李浩然, 孙春宝. 聚球藻对镍的富集作用及影响因素[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(5): 528–531.
- DU Zhu-wei, LI Hao-ran, SUN Chun-bao. Influencing factors on Ni bioaccumulation by *Synechococcus*[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(5): 528–531.
- [14] 支田田, 程丽华, 徐新华, 等. 藻类去除水体中重金属的机理及应用[J]. 化学进展, 2011, 23(8): 1782–1794.
- ZHI Tian-tian, CHENG Li-hua, XU Xin-hua, et al. Advances on heavy metals removal from aqueous solution by algae[J]. *Progress in Chemistry*, 2011, 23(8): 1782–1794.
- [15] Zhang J, Ding T, Zhang C. Biosorption and toxicity responses to arsenite (As[Ⅲ]) in *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(9): 1077–1084.
- [16] Paksirajan K, Worku A N, Acheampong M A, et al. Cr(Ⅲ) and Cr(Ⅵ) removal from aqueous solutions by cheaply available fruit waste and algal biomass[J]. *Applied and Biochemistry and Biotechnology*, 2013, 170(3): 498–513.
- [17] Bayramoglu G, Arica M Y. Preparation of a composite biosorbent using *scenedesmus quadricauda* biomass and alginate/polyvinyl alcohol for removal of Cu(Ⅱ) and Cd(Ⅱ) ions: Isotherms, kinetics, and thermodynamic studies[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2011, 221(1): 391–403.
- [18] 陶梅平. 活性藻类吸附重金属的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- TAO Mei-ping. Study on biosorption of heavy metals by the living algae[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.
- [19] Mirghaffari N, Moeini E F, Arhadian O. Biosorption of Cd and Pb ions from aqueous solutions by biomass of the green microalga, *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2015, 7(1): 311–320.
- [20] Basha S, Murthy Z V P. Kinetic and equilibrium models for biosorption of Cr(Ⅵ) on chemically modified seaweed, *Cystoseira indica*[J]. *Process Biochemistry*, 2007, 42(11): 1521–1529.
- [21] Montazer-Rahmati M M, Rabbani P, Abdolali A, et al. Kinetics and equilibrium studies on biosorption of cadmium, lead, and nickel ions from aqueous solutions by intact and chemically modified brown algae [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 185: 401–407.
- [22] 黄月华, 尹平河, 赵玲, 等. 球形棕囊藻对 Pb²⁺的吸附动力学[J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 930–933.
- HUANG Yue-hua, YIN Ping-he, ZHAO Ling, et al. Kinetics of Pb²⁺ biosorption by algae biomass of *Phaeocystis globosa*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(5): 930–933.
- [23] Amini M, Younesi H, Bahramifar N. Biosorption of U(Ⅵ) from aqueous solution by *Chlorella vulgaris*: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139(3): 410–421.
- [24] 张宏, 张敬华. 生物吸附的热力学平衡模型和动力学模型综述[J]. 天中学刊, 2009, 24(5): 19–22.
- ZHANG Hong, ZHANG Jing-hua. Review on thermodynamic equilibrium isotherm and kinetic model of biosorption[J]. *Journal of Tianzhong*, 2009, 24(5): 19–22.
- [25] Qiu H, Lu L V, Pan B C, et al. Critical review in adsorption kinetic models[J]. *Journal of Zhejiang University Science A*, 2009, 10(5): 716–724.