

蛋白核小球藻对铅、镉和汞吸附速率及其影响因素的研究

田 丹, 赵 文*, 魏 杰, 王 媛, 张 鹏

(大连海洋大学辽宁省水生生物学重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要:通过吸附时间、藻细胞密度和重金属浓度等参数条件的变化,研究蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)对海水中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附。结果表明,蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附率分别在 2~4 d 内快速升高后趋于平衡,而吸附量在第 1 d 达到最大值后逐渐变小。藻细胞密度为 $1 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,吸附量最大,当藻细胞密度达到 $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,吸附率增幅减小并趋于平衡。随着 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 浓度升高,吸附率呈逐渐变小趋势,吸附量却增加。蛋白核小球藻吸附 Pb^{2+} 符合 Freundlich 等温线方程,而吸附 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 符合 Dubimim–Radushkevich 等温线方程。蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的最大吸附量分别为 4.84 、 $37.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.61 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 吸附能力顺序为 $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Hg}^{2+}$ 。

关键词: Pb^{2+} ; Cd^{2+} ; Hg^{2+} ; 蛋白核小球藻; 吸附

中图分类号: X172 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672–2043(2011)12–2548–06

Biosorption Rate and Influence Factors of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} by *Chlorella pyrenoidosa*

TIAN Dan, ZHAO Wen*, WEI Jie, WANG Yuan, ZHANG Peng

(Key Laboratory of Hydrobiology in Liaoning Province, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: At present, heavy metals contamination has become a worldwide focus on concerning for the levels of pollution and its obvious impact on human health. In this paper, the biosorption of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} by *Chlorella pyrenoidosa* in seawater under different adsorption time, the cell density of algal and the concentrations of heavy metals were investigated, and the adsorption isotherm model was established to provide basic data for the biological treatment of heavy metal wastewater by algae. The results showed as follows: the adsorption rate of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} by *C. pyrenoidosa* increased rapidly in 2~4 days and then tended to balance, the amount of heavy metals adsorption reached the maximum at the first day and then decreased gradually. The amount of heavy metals adsorption reached the maximum at the algal cell density of $1 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$, the adsorption rate tended to balance at the algal cell density of $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$. With the concentrations of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} increasing, the adsorption rate showed a trend of gradually descent while the amount of heavy metals adsorption increased. The adsorption pattern of Pb^{2+} by *C. pyrenoidosa* was more in accordance with Freundlich isotherm equation, and the adsorption patterns of Cd^{2+} and Hg^{2+} were more in accordance with Dubimim–Radushkevich isotherm equation. The maximum amount of adsorption of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} were $4.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $37.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $5.61 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, and the order of adsorption capacity was $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Hg}^{2+}$.

Keywords: Pb^{2+} ; Cd^{2+} ; Hg^{2+} ; *Chlorella pyrenoidosa*; biosorption

目前, 重金属污染已经成为危害最大的水污染问题之一。重金属通过矿山开采、金属冶炼、金属加工及化工生产废水、化石燃料的燃烧、施用农药化肥

和生活垃圾等人为污染源, 以及地质侵蚀、风化等天然源形式进入水体, 加之重金属具有毒性大、在环境中不易被代谢、易被生物富集并有生物放大效应等特点, 不但污染水环境, 也严重威胁人类和水生生物的生存。因此, 水环境中的重金属污染已经成为一个全球性的环境问题, 引起了全社会的关注。常用的处理富含重金属工业废水的方法有化学沉淀法、离子

收稿日期: 2011–05–05

基金项目: 国家自然科学基金(40776065)

作者简介: 田 丹(1987—), 女, 硕士。E-mail: tiandan901@163.com

* 通讯作者: 赵 文 E-mail: zhaowen@dlou.edu.cn

交换法、吸附法、电解法、膜分离法、氧化还原法等^[1]。生物吸附法作为近年来一种新兴的重金属废水处理技术,因具有低成本、高效率、不产生二次污染等诸多优点,尤其适用于低浓度(<100 mg·L⁻¹)重金属废水的处理^[2],应用前景十分广阔。目前研究较集中的几种生物吸附剂有细菌^[3]、霉菌^[4]、酵母菌^[5]、藻类^[6]和植物^[7-8]。藻类因其易于获得、生长速度快、代谢迅速、吸附作用快且净化效率高等特点^[9],越来越受到人们的重视。国外从20世纪80年代开始开展这方面的研究^[10-14],国内近年来才陆续开始这方面的研究^[15-18]。这些研究大都是利用死亡藻体进行金属离子的吸附,利用活体微藻吸附低浓度重金属离子的研究还比较少见。本文主要通过吸附时间、藻细胞密度和重金属浓度等参数条件的变化,研究活体蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)对海水中Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺吸附的影响,并建立吸附等温线模型,为利用藻类进行重金属污水的生物治理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用蛋白核小球藻取自辽宁省水生生物学重点实验室。用于培养的三角瓶预先用高压灭菌锅120℃灭菌20 min,海水经过滤煮沸消毒。采用f/2营养盐配方,在光照培养箱中连续培养,温度(25±1)℃,光照强度2 500~3 000 lx,光暗周期12 h:12 h,每隔12 h摇瓶1次。

试验用Pb(NO₃)₂、CdCl₂·2.5H₂O、HgCl₂(分析纯)作为Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺来源,用超纯水配制成10 g·L⁻¹的母液,用无菌海水稀释至所需浓度(储备液)。

1.2 试验方法

1.2.1 吸附时间试验

取200 mL藻液(5×10⁶ cell·mL⁻¹)分别加入Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺的储备液使其浓度达到5、5、1 μg·L⁻¹,每个试验组设3个平行,每日取样20 mL进行测定。

1.2.2 藻细胞密度试验

蛋白核小球藻设1×10⁶、2×10⁶、4×10⁶、6×10⁶、8×10⁶ cell·mL⁻¹和10×10⁶ cell·mL⁻¹ 6个密度梯度,Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺浓度分别设5、5、1 μg·L⁻¹。藻液体积为100 mL,每个试验组设3个平行,7 d后取样进行测定。

1.2.3 重金属浓度试验

取100 mL藻液(5×10⁶ cell·mL⁻¹)分别加入储备液,Pb²⁺和Cd²⁺浓度分别为0.2、0.5、1、2、5 mg·L⁻¹和

10 mg·L⁻¹;Hg²⁺浓度分别为0.1、0.2、0.4、0.8、1.6 μg·L⁻¹和3.2 μg·L⁻¹,每个试验组设3个平行,7 d后取样进行测定。

1.2.4 样品测定

所取样品测定其在550 nm处的吸光度值(OD₅₅₀),并将藻液用微孔滤膜(孔径0.45 μm)抽滤,测定滤液中重金属离子的含量。铅和镉离子浓度用日立Z-2000原子吸收分光光度计测定,汞离子浓度用意大利DMA-80测汞仪测定。

1.3 数据计算

试验结果均用3个平行的平均值表示,并按下式计算蛋白核小球藻对Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺的吸附率及吸附量:

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

$$\text{吸附量}(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}) = (C_0 - C) / A$$

式中:C₀和C分别为Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺的起始浓度和终浓度,A为藻液的OD₅₅₀值。

1.4 吸附等温线方程

将数据用以下3个吸附等温线方程进行拟合:

$$\text{Langmuir 方程: } Q = Q_{\max} b C_e / (1 + b C_e)$$

$$\text{Freundlich 方程: } Q = k C_e^{1/n}$$

$$\text{Dubimim-Radushkevich 方程: } \ln Q = \ln Q_{\max} - BE^2$$

式中:Q为吸附量,Q_{max}为最大吸附量,C_e为吸附平衡时溶液中重金属离子的浓度;b为Langmuir方程与吸附能量有关的常数,表征吸附剂与吸附质的亲和力;k为Freundlich方程吸附平衡常数,表征吸附剂的吸附能力;n为Freundlich方程吸附平衡常数;B为Dubimim-Radushkevich方程与吸附能有关的常数;E为Polanyi活化能,E=RTln(1+1/C_e);R为气体常数(8.31 J·mol⁻¹·K⁻¹);T为绝对温度。

2 结果与分析

2.1 吸附时间对吸附的影响

蛋白核小球藻对Pb²⁺、Cd²⁺和Hg²⁺的吸附率均随吸附时间延长而增大,而吸附量则相反。由图1可知,蛋白核小球藻对Pb²⁺的吸附率在第4 d达到平衡之后趋于稳定,此时的吸附率为60.7%,吸附量为11.6 μg·L⁻¹。蛋白核小球藻对Cd²⁺的吸附率在第3 d达到平衡之后趋于稳定,此时的吸附率为78.6%,吸附量为8.64 μg·L⁻¹,吸附量在前4 d明显减少而后3 d减幅不大。蛋白核小球藻对Hg²⁺的吸附率在第2 d达到平衡之后趋于稳定,此时的吸附率为29.4%,吸附量为0.450 μg·L⁻¹,吸附量在前4 d明显减少而后3 d减幅

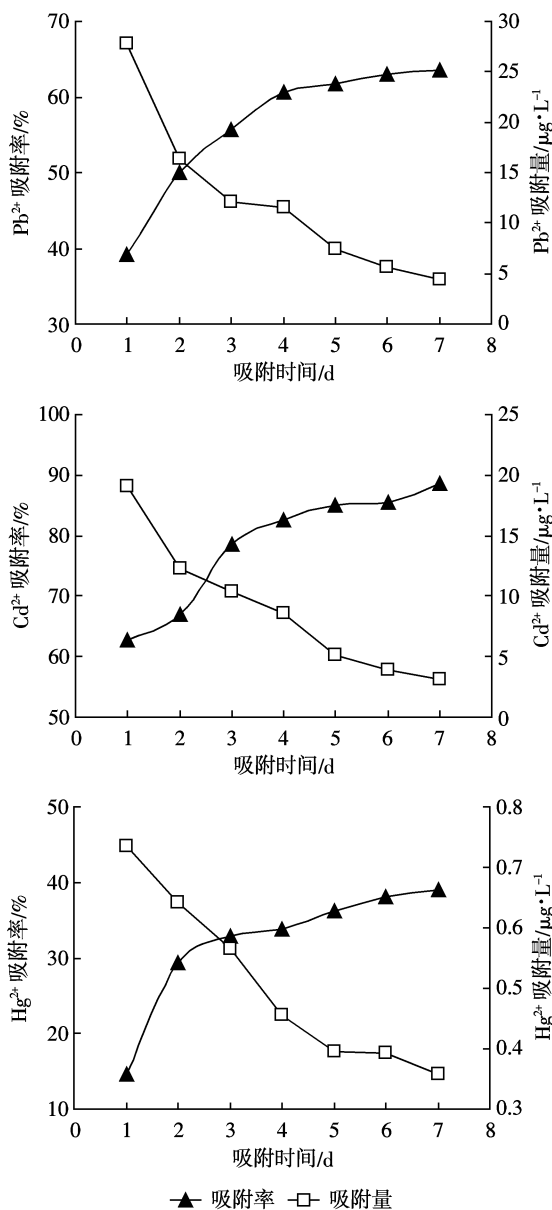


图 1 吸附时间对蛋白核小球藻吸附 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的影响
Figure 1 Effect of adsorption time on biosorption of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} by *Chlorella pyrenoidosa*

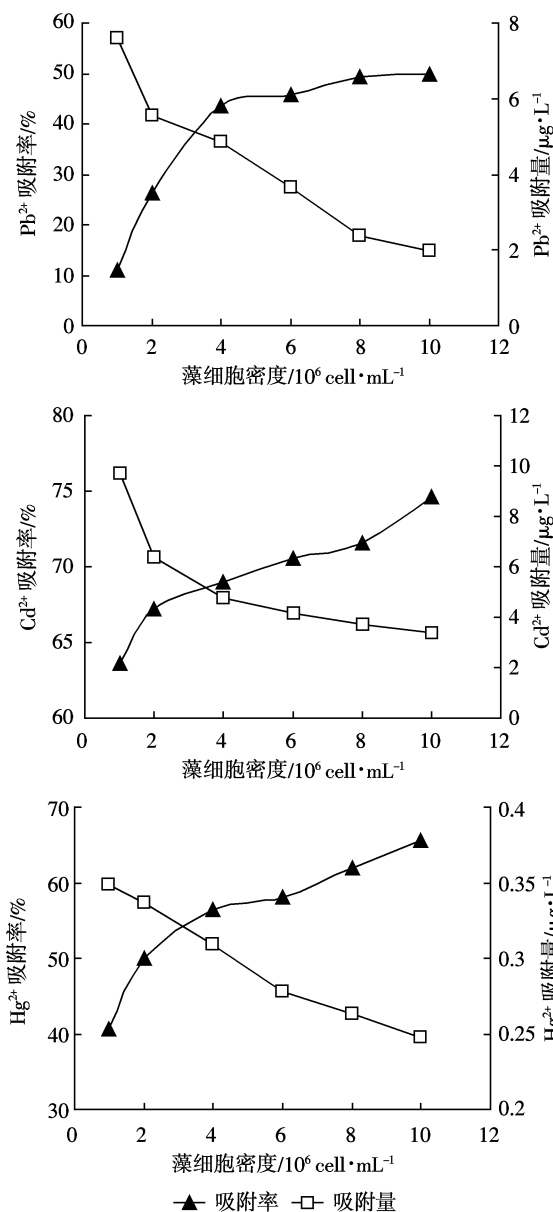


图 2 藻细胞密度对蛋白核小球藻吸附 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的影响
Figure 2 Effect of algal cell density on biosorption of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} by *Chlorella pyrenoidosa*

不大。

2.2 藻细胞密度对吸附的影响

由图 2 可见,随着蛋白核小球藻初始密度增加,藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附率均逐渐增大。当藻细胞密度达到 $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 吸附率增幅减小并趋于平衡,此时吸附率分别为 43.6%、69.0%、56.4%,吸附量分别为 4.86 、 4.79 、 $0.310 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附量均随藻初始密度增加而逐渐减小,并且对 Cd^{2+} 的吸附量在藻细胞密度为 $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时减小幅度逐渐变小,趋于平衡。

2.3 重金属浓度对吸附的影响

重金属浓度对蛋白核小球藻吸附 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的影响见图 3。结果表明,随 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 初始浓度升高,小球藻对 Pb^{2+} 的吸附率呈降低趋势,而吸附量逐渐升高。当 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 初始浓度为最小时,吸附率均最高,分别为 49.8%、58.1%、89.9%;当 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 初始浓度为最大时,吸附量均最高,分别为 2.45 、 $6.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.51 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 吸附等温线方程

分别用 Langmuir、Freundlich 和 Dubimim-Radush-

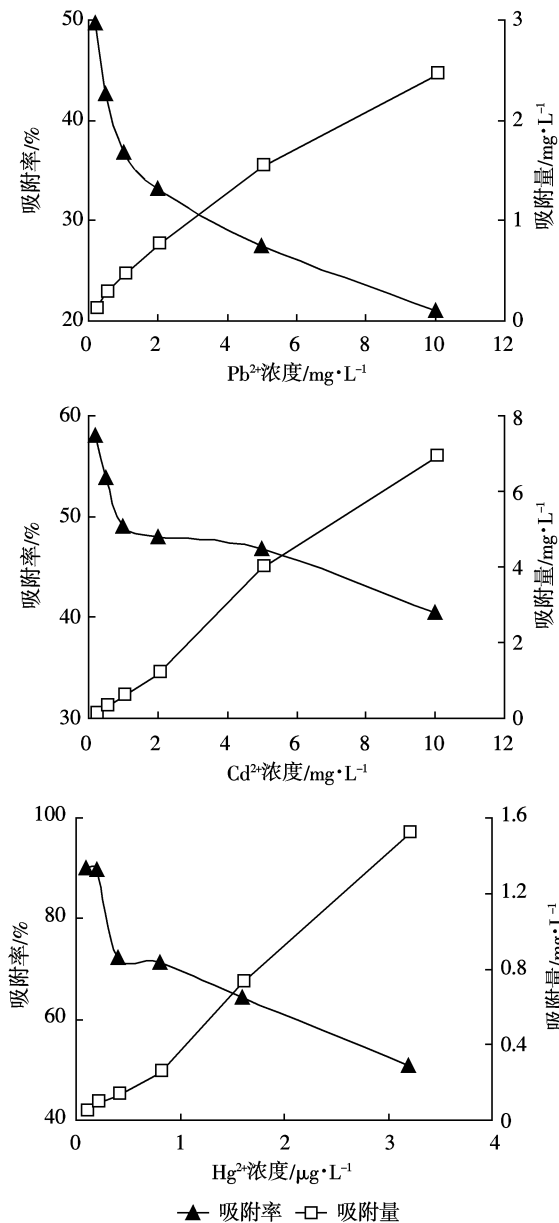


图 3 重金属浓度对蛋白核小球藻 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 吸附的影响
Figure 3 Effect of heavy metal concentration on biosorption of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Hg^{2+} by *Chlorella pyrenoidosa*

keovich 等温线方程拟合蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附过程, 得到相关参数见表 1。比较表 1 中 R^2 值可知, 蛋白核小球藻吸附 Pb^{2+} 用 3 个等温线方程

均可表示, 但用 Freundlich 等温线方程表示更好; 蛋白核小球藻吸附 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 用 Freundlich 和 Dubimim-Radushkevich 等温线方程均可表示, 但用 Dubimim-Radushkevich 等温线方程表示更好。根据 Dubimim-Radushkevich 等温线方程拟合参数还可知, 蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的最大吸附量分别为 4.84 、 $37.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.61 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 可见蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附能力顺序为 $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Hg}^{2+}$, 且对 Cd^{2+} 的吸附能力尤其突出。

3 讨论

研究表明, 吸附时间能影响藻类对重金属的吸附。Klimmek 等^[19]用鞘颤藻吸附 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} , 30 min 后就达到平衡。藻类吸附重金属离子一般分为两个阶段, 第一阶段是物理吸附, 速度较快; 第二阶段是一个能量驱动的新陈代谢过程, 受到能量多少 (如糖类) 和阻止新陈代谢的物质影响, 速度较慢^[20]。本试验结果表明, 小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附率分别在 2~4 d 内快速升高后趋于平衡, 而吸附量在第 1 d 最大之后逐渐变小。有文献报道^[21], 随着时间延长, 藻类生长迅速, 新陈代谢旺盛, 释放出蛋白质、脂肪等物质, 金属离子解吸增加, 造成吸附量下降。姜爱莉等^[22]对球等鞭金藻 (*Isochrysis galbana*) 吸附 5 种重金属离子的研究也表明, 在培养的最初 1~2 d 吸附量达到最大值, 随后吸附量又下降。研究表明^[23-24], 处于培养指数生长期的藻类对金属离子的吸附率最高。本试验中当蛋白核小球藻细胞密度升到 $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 吸附率逐渐增加之后增幅减小并趋于平衡, 说明细胞密度在 $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 到 $10 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 之间的蛋白核小球藻正处于指数生长期。

通常, 藻类的细胞壁主要由多聚糖、蛋白质和脂类等生物大分子组成, 具有较大的表面积和粘性, 带有一定的负电荷, 能提供许多可与金属离子相结合的活性基团, 如羧基、氨基、酰胺基、羟基、磷酸基、硫酸脂基等配体^[25]。试验结果显示, 随着重金属离子初始

表 1 拟合的相关参数

Table 1 Comparison of adsorption constants

元素	Langmuir 方程			Freundlich 方程			Dubimim-Radushkevich 方程		
	Q_{max}	b	R^2	k	n	R^2	Q_{max}	B	R^2
Pb	3.539 8	0.248 8	0.938 9	0.607 5	1.426 9	0.997 5	4.840 6	2×10^{-7}	0.952 3
Cd	—	—	0.057 7	1.435 6	0.860 7	0.966 8	37.736 3	2×10^{-7}	0.996 3
Hg	44.444 4	0.026 5	0.006 8	0.547 5	1.182 5	0.887 3	5.605 3	4×10^{-7}	0.997 6

浓度升高,吸附率逐渐变小,当藻细胞密度一定时,可供重金属离子吸附结合的活性基团数量也一定,重金属离子浓度越高可供吸附的活性基团相对越少,吸附率就降低。这表明蛋白核小球藻更适合从低浓度的溶液中吸附 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} ,此结果与国内外文献中报道的生物吸附适于从低浓度溶液中回收金属的结果相似^[12,26]。蛋白核小球藻对不同重金属的吸附率和吸附量均不同,表明蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附存在特异性,这可能与细胞内不同的重金属结合体有关。另外, Pb^{2+} 进入海水后容易与其他离子结合形成难溶性化合物,也可能使蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 的吸附能力降低。试验中发现,蛋白核小球藻对 Hg^{2+} 的耐受力远较对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的低,这有可能是蛋白核小球藻对 Hg^{2+} 的吸附能力低于其对 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附能力的原因。

随着对藻类重金属生物吸附的研究不断深入,利用吸附模型来描述藻类吸附重金属的反应、平衡行为越来越受到关注。本试验中分别用 Langmuir、Freundlich 和 Dubimim-Radushkevich 等温线方程来拟合蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附过程,得到了较好的效果,但由于藻细胞表面结构十分复杂,这并不能反应真正的吸附机理。

综上所述,蛋白核小球藻对 3 种重金属离子均有一定的吸附能力,并且吸附过程可以用相应的等温线方程进行拟合。但实际上,藻类吸附重金属离子的机理却十分复杂,特别是对于活藻,它不同于简单的物理吸附和离子交换,这不仅与藻类细胞的化学组成和代谢活动有关,还受到一些其他因素的影响。因此,在利用藻类进行重金属污水的生物治理之前,还需要对其吸附重金属离子的具体机制做进一步的研究。

4 结论

(1)蛋白核小球藻在吸附的第 1 d 对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 吸附量达到最大值,并且藻细胞密度达到 $4 \times 10^6 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,对 3 种重金属具有较高的吸附率,溶液中 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 浓度越低吸附率越大。

(2)蛋白核小球藻吸附 Pb^{2+} 用 Freundlich 等温线方程表示较好,而吸附 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 用 Dubimim-Radushkevich 等温线方程表示较好。

(3)蛋白核小球藻对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 的吸附能力顺序为 $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Hg}^{2+}$,且对 Cd^{2+} 的吸附能力尤其突出,最大吸附量达到 $37.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 汪大翠,徐新华,宋 爽.工业废水中专项污染物处理手册[M].北京:化学工业出版社,2000.
WANG Da-cui, XU Xin-hua, SONG Shuang. Specific pollutants in industrial wastewater treatment manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [2] 王文华,冯咏梅,常秀莲,等.玉米芯对废水中铅的吸附研究[J].水处理技术,2004,30(2):95-98.
WANG Wen-hua, FENG Yong-mei, CHANG Xiu-lian, et al. Removal of lead from aqueous solution by corncobs [J]. *Technology of Water Treatment*, 2004, 30(2):95-98.
- [3] Sufia K K, Susanta K D, Pinaki S. Lanthanum biosorption by a *Pseudomonas* sp.: Equilibrium studies and chemical characterization[J]. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 2006, 33: 773-783.
- [4] Adeline S Y T, Chuan C C. Bioaccumulation and biosorption efficacy of *Trichoderma* isolate SP2F1 in removing copper ($\text{Cu}(\text{II})$) from aqueous solutions[J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2009, 25: 1431-1437.
- [5] Ying Z, Chunhui F, Qingjuan M, et al. Biosorption of Pb^{2+} by *Saccharomyces cerevisiae* in static and dynamic adsorption tests[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2009, 83: 708-712.
- [6] Fourest E, Volesky B. Alginate properties and heavy metal biosorption by marine algae[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 1997, 67: 215-226.
- [7] Keskinan O, Goksu M Z L, Basibuyuk M, et al. Heavy metal adsorption properties of a submerged aquatic plant[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 92(2): 197-200.
- [8] Schneider I A H, Rubio J, Smith R W. Biosorption of heavy metals onto plant biomass: Exchange adsorption or surface precipitation[J]. *Int J Miner Processing*, 2001, 62(14): 11-20.
- [9] 莫健伟,姚兴东,张谷兰,等.海藻去除水中双偶氮染料机理及重金属离子研究[J].中国环境科学,1997,17(3):241-243.
MO Jian-wei, YAO Xing-dong, ZHANG Gu-lan, et al. Study on the removal mechanism of azo dyes and heavy metal ions in water with algae (*U. lactuca* L.) [J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(3): 241-243.
- [10] Leusch A, Holan Z R, Volesky B. Biosorption of heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) by chemically reinforced biomass of marine algae[J]. *J Chem Tech Biotechnol*, 1995, 62(3): 279-288.
- [11] Wilke A, Bunke G, Gotz P, et al. Removal of lead, cadmium, zinc and nickel by adsorption on microalgae[J]. *Prog Min Oilfield Chem*, 1999, 1(4): 337-344.
- [12] Volesky B, Holan Z R. Biosorption of heavy metals[J]. *Biotechnol Prog*, 1995, 11: 236-241.
- [13] Bakkaloglu I, Butter T J, Evison L M, et al. The kinetics of metal uptake by microbial biomass: Implications for the design of a biosorption reactor[J]. *Wat Sci Tech*, 1998, 38: 269-275.
- [14] Matsunaga T, Takeyama H, Nakao T, et al. Screening of marine microalgae for bioremediation of cadmium-polluted seawater[J]. *Journal of Biotechnology*, 1999, 70: 33-40.
- [15] 林荣根,黄朋林,周俊良.两种褐藻对铜和镉的吸着及洗脱研究[J].海洋环境科学,1999,18(4):8-13.

- LIN Rong-gen, HUANG Peng-lin, ZHOU Jun-liang. Study on the adsorption and desorption of copper and cadmium in water on two species of brown algae[J]. *Marine Environmental Science*, 1999, 18(4):8-13.
- [16] 李英敏, 杨海波, 吕福荣, 等. 小球藻对 Pb^{2+} 的吸附及生物吸附机理初探[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4):696-699.
- LI Ying-min, YANG Hai-bo, LU Fu-rong, et al. Sorption of Pb^{2+} by *Chlorella Vulgaris* and biosorption mechanism[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4):696-699.
- [17] 尹平河, 赵玲, YU Qi-ming, 等. 海藻生物吸附废水中铅、铜和镉的研究[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(3):11-15.
- YIN Ping-he, ZHAO Ling, YU Qi-ming, et al. Biosorption of lead, copper and cadmium by marine macro algae[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(3):11-15.
- [18] 高正权, 孟春晓. 微藻与水环境修复[J]. 环境科学与技术, 2008, 25(3):21-25.
- GAO Zheng-quan, MENG Chun-xiao. Microalgae and rehabilitation of water environment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 25(3):21-25.
- [19] Klimmek S, Stan H J. Comparative analysis of the biosorption of cadmium, lead, nickel, and zinc by algae[J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(21):4283-4288.
- [20] 张永亮, 张浩江, 谢水波, 等. 藻类吸附重金属的研究进展[J]. 铀矿冶, 2009, 28(1):31-37.
- ZHANG Yong-liang, ZHANG Hao-jiang, XIE Shui-bo, et al. Research advances in adsorption of heavy metals by algae[J]. *Uraium Mining and Metallurgy*, 2009, 28(1):31-37.
- [21] 傅华龙, 秦捷, 陈浩. 轮藻对4种重金属离子的净化与富集作用[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2001, 38(2):263-268.
- FU Hua-long, QIN Jie, CHEN Hao, et al. Study on *Charophytes* ability to purify and accumulate the heavy metal ions[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2001, 38(2):263-268.
- [22] 姜爱莉, 路艳君, 李国栋, 等. 球等鞭金藻对5种金属离子的吸附作用研究[J]. 海洋科学进展, 2010, 28(2):224-228.
- JIANG Ai-li, LU Yan-jun, LI Guo-dong, et al. Study on biosorption of ions from 5 heavy metal elements by *Lsochrysis galbana*[J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 28(2):224-228.
- [23] 李英敏, 杨海波, 吕福荣, 等. 小球藻对 Cu^{2+} 的吸附性能及动力学研究[J]. 能源环境保护, 2004, 18(6):36-39.
- LI Ying-min, YANG Hai-bo, LU Fu-rong, et al. Study on Cu^{2+} adsorption kinetics and characteristics of adsorption on *Chlorella vulgaris*[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, 18(6):36-39.
- [24] 李英敏, 杨海波, 张欣华, 等. 活性小球藻对铅离子的吸附与解吸特征研究[J]. 生物技术, 2007, 17(6):70-72.
- LI Ying-min, YANG Hai-bo, ZHANG Xin-hua, et al. Characteristics of adsorption and desorption of lead on live *Chlorella vulgaris* [J]. *Biotechnology*, 2007, 17(6):70-72.
- [25] 陈小霞, 梁世中, 吴振强, 等. 热致死小球藻生物富集 Cr^{3+} 的研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(4):54-57.
- CHEN Xiao-xia, LIANG Si-zhong, WU Zhen-qiang, et al. A study on bioaccumulation of chromium(Ⅲ) with thermal-killed *Chlorella vulgaris*[J]. *Marine Science*, 2003, 27(4):54-57.
- [26] 杨晶. 柠檬酸杆菌吸附重金属镉的研究[J]. 水处理技术, 2009, 25(5):64-67.
- YANG Jing. Study on biosorption of heavy metal ion-cadmium by *Citrobacter freudii*[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 25(5):64-67.