

研究报告

普通小球藻对复合重金属镉和铬的生物吸附及影响因素

蒯玉琴^{*1}, 赖金霞¹, 雷贇¹, 任春燕¹, 张明旭², 孔维宝¹, 贾凌云¹

1 西北师范大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730070

2 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730070

蒯玉琴, 赖金霞, 雷贇, 任春燕, 张明旭, 孔维宝, 贾凌云. 普通小球藻对复合重金属镉和铬的生物吸附及影响因素[J]. 微生物学通报, 2022, 49(1): 39-48

Xi Yuqin, Lai Jinxia, Lei Yun, Ren Chunyan, Zhang Mingxu, Kong Weibao, Jia Lingyun. Biosorption of Cd²⁺ and Cr³⁺ by *Chlorella vulgaris* and its influencing factors[J]. Microbiology China, 2022, 49(1): 39-48

摘 要:【背景】微藻对重金属具有极强的耐受性, 而且具有较高的吸附率, 是一种优良的生物吸附剂。【目的】探究环境因素对小球藻吸附镉离子(Cd²⁺)和铬离子(Cr³⁺)的影响。【方法】以普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)在不同条件下对重金属离子的吸附率为基准, 利用 CdCl₂·2H₂O 和 CrCl₃·7H₂O 提供重金属离子, 根据不同处理下小球藻吸附率的变化情况探讨重金属离子浓度、pH 和温度等环境因素对普通小球藻吸附 Cd²⁺和 Cr³⁺的影响。【结果】在温度为 30 °C、pH 值为 5.5、Cd²⁺和 Cr³⁺浓度分别为 0.4 mg/L 和 4.0 mg/L 及生物量为 0.59 g/L 的条件下, 普通小球藻对复合 Cd²⁺和 Cr³⁺吸附率达到最大, 吸附率分别达到 84.5%和 75.2%, 同时发现普通小球藻对 Cd²⁺的吸附率大于 Cr³⁺。【结论】小球藻对 Cd²⁺和 Cr³⁺的吸附受环境因素的影响, 而且对不同的重金属具有一定的选择性。

关键词: 生物吸附; 普通小球藻; 镉离子; 铬离子

Biosorption of Cd²⁺ and Cr³⁺ by *Chlorella vulgaris* and its influencing factors

XI Yuqin^{*1}, LAI Jinxia¹, LEI Yun¹, REN Chunyan¹, ZHANG Mingxu², KONG Weibao¹, JIA Lingyun¹

1 College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China

2 College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730070, Gansu, China

Abstract: [Background] Microalgae are resistant to heavy metals and have high adsorption rates,

基金项目: 甘肃省科技计划项目重点研发计划(20YF8FA050); 2019 年甘肃省高等学校创新能力提升项目

Supported by: Gansu Provincial Science and Technology Project Key Research and Development Plan (20YF8FA050); Gansu Provincial Higher Education Innovation Ability Improvement Project in 2019

*Corresponding author: E-mail: xiYuqin@nwnu.edu.cn

Received: 2021-03-18; Accepted: 2021-07-05; Published online: 2021-09-13

which can serve as an excellent biosorbent. **[Objective]** To explore the influences of environmental factors on the adsorption of Cd^{2+} and Cr^{3+} by *Chlorella vulgaris*. **[Methods]** Using $\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CrCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ to provide heavy metal ions, we explored the influences of environmental factors such as the concentrations of heavy metal ions, pH, and temperature on the adsorption of Cd^{2+} and Cr^{3+} by *C. vulgaris*. **[Results]** At 30 °C, pH 5.5, Cd^{2+} concentration of 0.4 mg/L, Cr^{3+} concentration of 4.0 mg/L, and *C. vulgaris* biomass of 0.59 g/L, the adsorption rates of Cd^{2+} and Cr^{3+} by *C. vulgaris* reached the maximums of 84.5% and 75.2%, respectively. The adsorption rate of *C. vulgaris* to Cd^{2+} was greater than that to Cr^{3+} . **[Conclusion]** The adsorption of *C. vulgaris* to Cd^{2+} and Cr^{3+} is affected by environmental factors and *C. vulgaris* has certain preference to different heavy metals.

Keywords: biosorption; *Chlorella vulgaris*; cadmium ion; chromium ion

随着现代工业的不断发展与推进, 废水的排放量日益增多, 造成水体污染, 使得水资源遭受严重损失^[1-2]。铬(Cr)和镉(Cd)是具有难降解、易累积、毒性大等特点的有毒重金属, 同时也是致癌、致畸和致突变物质^[3]。有研究发现马来西亚双威吉隆坡自来水中的 Cd 和 Cr 浓度分别为 1.3×10^{-5} mg/L 和 6.75×10^{-3} mg/L^[4]。Ong 等^[5]研究发现马来西亚吉隆坡自来水中的 Cd 和 Cr 浓度分别为 1.33×10^{-3} mg/L 和 1.24×10^{-3} mg/L。Tapia 等^[6]研究发现智利 Maule 地区沿海城镇 3 种双壳贝类 *Ameghinomya antiqua*、*Aulacomya atra* 和 *Mytilus chilensis* 中 Cd、Cr 和 Pb 的净重浓度范围分别为 0.21–4.32、0.38–12.62 和 0.43–31.10 mg/kg, 对贝类消费者的健康存在潜在危害。有研究者对尼日利亚 2009–2018 年因使用优质汽油(premium motor spirit, PMS)和汽车瓦斯油(automotive gas oil, AGO)而产生的铬和镉排放量进行评估发现, 2018 年排放率最高, 铬为 144.54×10^8 mg/a, 镉为 395.8×10^8 mg/a^[7]。铬和镉的环境污染对湖泊等水生态系统造成严重影响, 同时也会通过食物链对水生生物及人类健康造成严重威胁, 是无法忽视的生态危害之一^[3]。

大量研究表明, 藻类、真菌、酵母菌等多

种微生物都可用于处理被毒性金属离子污染的废水^[8], 尤其是以微藻为代表的吸附材料对重金属具有更强的吸附性。由于多糖、蛋白质和糖醛酸等聚复合体大量存在于藻细胞壁及一些胞外产物中, 可为金属离子的结合提供羧基、羟基、氨基等官能团^[9]。研究表明, 小球藻能很好地吸附 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cr^{3+} 等重金属离子, 而且可通过固液分离法对吸收在藻细胞表面的重金属进行回收利用^[10-13]。在多种重金属混合污水中藻类与重金属结合能力及对重金属的亲性能不尽相同: $\text{Pb} > \text{Fe} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Se} > \text{As}$ ^[14]。目前, 藻类吸附单一重金属及重金属对藻类毒性效应的相关研究普遍较多, 关于吸附复合重金属的研究报道较少, 尤其是生物吸附在镉和铬这 2 种重金属复合存在时的处理效果鲜有报道, 但重金属污染的废水中不是只有某一种重金属, 而是多种重金属同时存在, 多种环境因素会直接或间接地影响到生物吸附, 如对其吸附过程中的最佳 pH 值、温度进行探索, 可调节废水 pH 及生物吸附时的温度提高藻类的吸附率, 以达到更好的处理效果。因此, 研究生物吸附对复合重金属的影响及环境因素的作用对生物法处理重金属污染废水具有重要意义。

普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)是地球进化过程中出现最早的生物之一,对重金属镉和铬均有较好的吸附性。本实验以普通小球藻为实验材料,在研究单一和复合 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 对普通小球藻毒性效应及吸附的基础上^[15-16],通过测定不同的 pH、温度及 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 不同浓度下普通小球藻对 2 种重金属的吸附情况,确定较优吸附条件的同时,比较普通小球藻对 2 种重金属分别吸附及复合吸附之间的效果差异,以期在水体重金属污染处理提供理论参考。

1 材料与方 法

1.1 供试藻种

普通小球藻(*Chlorella vulgaris*)购自中国科学院水生生物研究所淡水藻种库(FACHB-8)。

1.2 主要试剂和仪器

$\text{CdCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CrCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 等,甘肃金博研生物科技有限公司。立式自动电热压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械有限公司;恒温光照摇床,江苏太仓市实验设备厂;超净工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;紫外可见分光光度计、电子天平,岛津公司。

1.3 方 法

1.3.1 实验设计

普通小球藻的培养利用 SoilEM 培养基^[17]。未添加 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 作为对照, $\text{Cd}^{2+} + \text{Cr}^{3+}$ 分别添加 0.1+1.0、0.2+2.0、0.3+3.0、0.4+4.0、0.5+5.0、0.6+6.0、0.7+7.0、0.8+8.0 (+号前为 Cd^{2+} 浓度, +号后为 Cr^{3+} 浓度,二者单位均为 mg/L) 浓度梯度于 SoilEM 培养基中作为实验处理组,于 25 °C、100 r/min (光暗比为 12 h:12 h) 连续培养 6 d。每组 3 个平行,使溶液总体积为 100 mL,期间每隔 24 h 测定普通小球藻

藻密度,培养结束后进行生物量和吸附量的测定。

1.3.2 藻细胞生物量的测定

使用干重法^[18]得到藻细胞干重(g/L),将普通小球藻连续培养 6 d 后,取样并按依次稀释 10 倍的比例稀释成 9 组不同浓度的样品,测定稀释后各浓度样品在 680 nm 处的吸光值,后将全部藻样烘干至恒重并用干重法得到其细胞干重(g/L)。利用浊度比色法^[19]测定藻液在 680 nm 处的吸光值,以此绘制普通小球藻藻密度与吸光值之间的标准曲线。得到线性回归方程式 $y=0.9508x+0.012$ ($R^2=0.9985$),根据此公式可计算普通小球藻在不同培养条件下的生物量。

1.3.3 普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率测定

将培养 6 d 后的藻液于 11 000 r/min 离心 20 min,利用无菌水洗涤后再离心,将上清液进行合并,利用 PE 原子吸收光谱仪对上清液中 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的浓度进行测定,计算吸附率: 吸附率 = $[1 - (C_2V_2/C_1V_1)] \times 100\%$ 。式中 C_1 为加入的 Cd^{2+} 或 Cr^{3+} 溶液的浓度(mg/L); C_2 为上清液中 Cd^{2+} 或 Cr^{3+} 的浓度(mg/L); V_1 为加入的 Cd^{2+} 或 Cr^{3+} 溶液的体积(L); V_2 为最终藻液的总体积(L)。

1.4 数据统计与分析

运用 Origin 8.0 软件作图,实验数据分析使用 SPSS 22.0 统计学软件, $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同浓度的复合 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 对藻生物量的影响

探究了复合 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 对普通小球藻生长的影响(图 1),普通小球藻的生物量累积随重金属浓度的增加呈递减趋势。当重金属 $\text{Cd}^{2+} + \text{Cr}^{3+}$ 的浓度在 0.1+1.0 mg/L 至 0.5+5.0 mg/L 范围内,其

生物量无较大差异($P>0.05$); 当 $\text{Cd}^{2+}+\text{Cr}^{3+}$ 的浓度大于 $0.6+6.0 \text{ mg/L}$ 时, 其生物量呈明显下降趋势($P<0.05$), 比对照组少 57.94%左右。观察培养瓶中的普通小球藻, 发现颜色由绿变黄, 表明重金属浓度越高则对普通小球藻的毒害作用越大, 当浓度超过藻细胞的耐受限度 $0.6+6.0 \text{ mg/L}$ 时会导致藻体部分死亡。

2.2 普通小球藻对复合重金属 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附的影响因素

2.2.1 浓度对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附的影响

不同重金属浓度处理下测定普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附量。结果如图 2 所示, 在温度相同、重金属浓度不同的条件下, 普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率在重金属浓度为 $0.4+4.0 \text{ mg/L}$ 时最高, 而且普通小球藻的生物量在此浓度下达到了 0.59 g/L 。

2.2.2 温度对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附的影响

温度在一定范围内会影响金属离子的生物吸附, 在金属离子生物吸附过程中起着至重

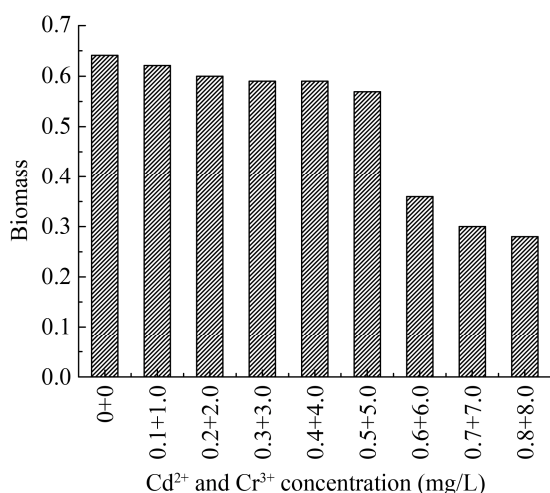


图 1 复合 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 不同浓度下的普通小球藻生物量

Figure 1 *Chlorella vulgaris* biomass under different concentrations of compound Cd^{2+} and Cr^{3+} .

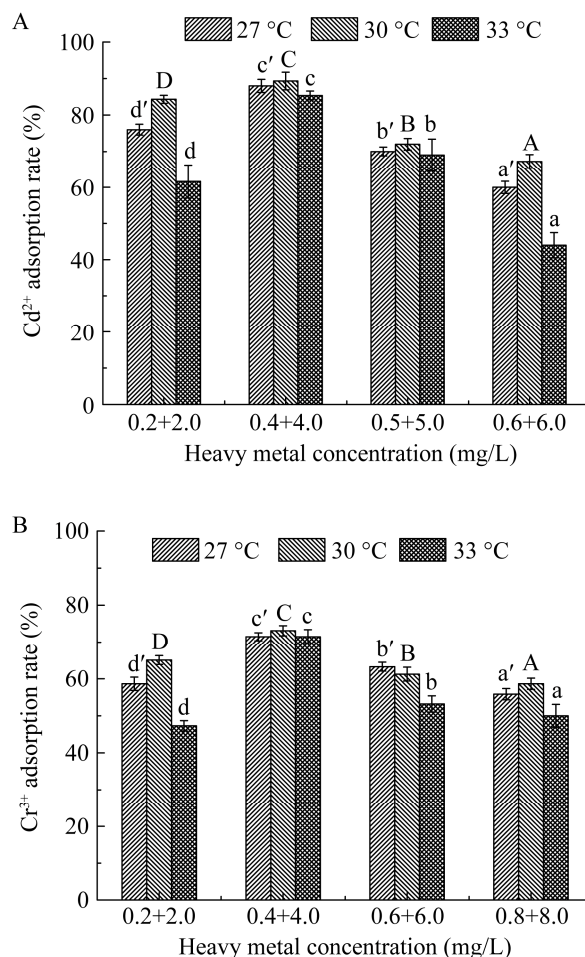


图 2 不同浓度下普通小球藻对 Cd^{2+} (A) 和 Cr^{3+} (B) 的吸附率 在温度相同、浓度不同的条件下进行差异显著性分析, 差异显著用不同字母表示, $P<0.05$

Figure 2 Adsorption rate of Cd^{2+} (A) and Cr^{3+} (B) by *Chlorella vulgaris* at different concentrations. Under the conditions of the same temperature and different concentrations, the difference significance analysis is carried out, and the significant differences are indicated by different letters, $P<0.05$.

要的作用^[20]。重金属浓度为 $0.4+4.0 \text{ mg/L}$ 时, 测定不同温度处理下普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附量。结果如图 3 所示, 不同温度处理下, 普通小球藻在 27°C 和 33°C 对重金属 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 的吸附率均低于 30°C 。由此可见, 普通小球藻

在 30 °C 和 0.4+4.0 mg/L 的 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 浓度下, 其吸附 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的效果最好。

2.2.3 pH 对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附的影响

在生物吸附现象中, 因为质子可以被吸附或释放, pH 影响金属离子溶解度和生物吸附剂总电荷 2 个方面^[21]。同一重金属浓度和温度、

不同初始 pH 处理下测定普通小球藻对重金属 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附量(图 4)发现, 普通小球藻在 pH 值为 5.5 时对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率均高于 pH 值为 6.5 时的吸附率。一般情况下, 重金属废水呈弱酸性, 而且预实验表明普通小球藻在 pH 值为 5.5 的环境中能够正常生长, 由此推测普通小球藻吸附重金属 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的最适 pH 值为 5.5。

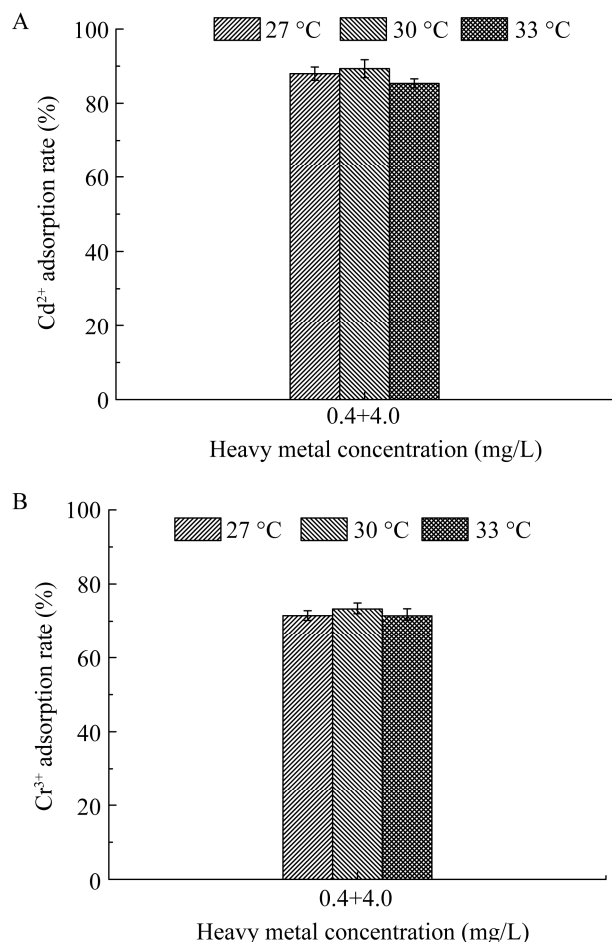


图 3 普通小球藻在不同温度下对 Cd^{2+} (A) 和 Cr^{3+} (B) 的吸附率 温度不同、重金属浓度相同的条件下进行差异显著性分析, 差异显著用不同字母表示, $P < 0.05$

Figure 3 The Adsorption rate of Cd^{2+} (A) and Cr^{3+} (B) by *Chlorella vulgaris* at different temperatures. Differences are analyzed under the conditions of different temperatures and the same concentration of heavy metals. Significant differences are indicated by different letters, $P < 0.05$.

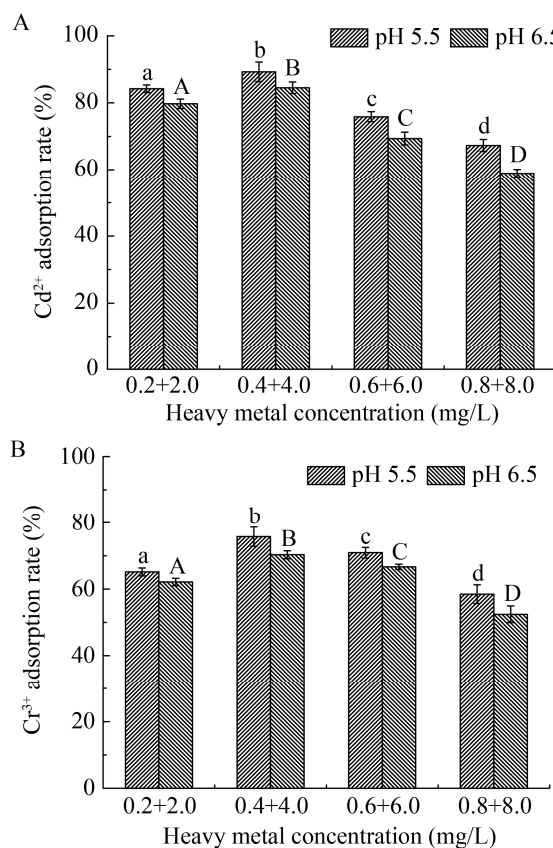


图 4 普通小球藻在不同 pH 条件下对 Cd^{2+} (A) 和 Cr^{3+} (B) 的吸附率 在浓度、温度相同及 pH 不同的条件下进行差异显著性分析, 差异显著用不同字母表示, $P < 0.05$

Figure 4 The adsorption rate of *Chlorella vulgaris* to Cd^{2+} (A) and Cr^{3+} (B) under different pH conditions. Under the conditions of the same concentration and temperature, and different pH, the significance of the difference is analyzed, and the significant difference is represented by different letters, $P < 0.05$.

2.3 比较普通小球藻在 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 复合胁迫与单一处理条件下的吸附率

从图5实验结果可知,在浓度为 0.4+4.0 mg/L 时,当 Cd^{2+} 单独存在时普通小球藻对 Cd^{2+} 的吸附率为 87.9%,而 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 同时存在时 Cd^{2+}

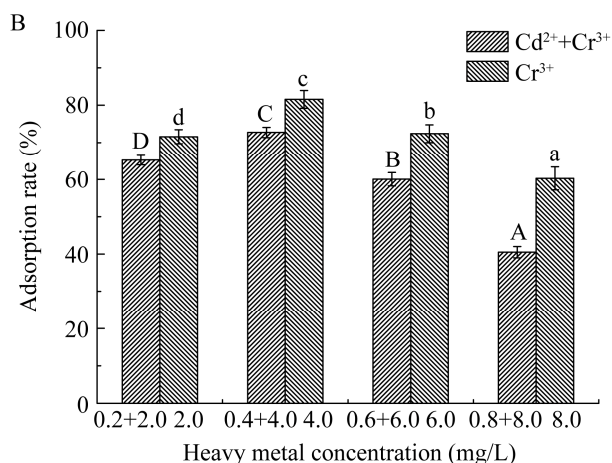
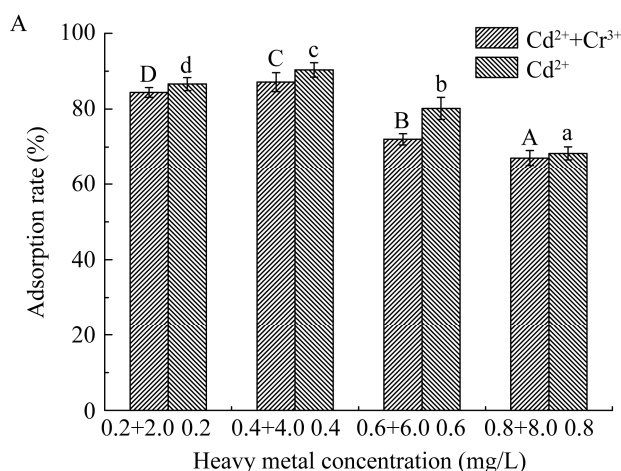


图5 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 共同与单一处理下普通小球藻对 Cd^{2+} (A) 和 Cr^{3+} (B) 的吸附率 在 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 复合与单一存在时对普通小球藻的吸附率进行差异显著性分析, 差异显著用不同字母表示, $P < 0.05$

Figure 5 Adsorption rate of Cd^{2+} (A) and Cr^{3+} (B) on *Chlorella vulgaris* under Cd^{2+} and Cr^{3+} together and single treatment. When Cd^{2+} and Cr^{3+} exist in combination and single, the adsorption rate of *C. vulgaris* is analyzed for the significant difference, and the significant difference is indicated by different letters, $P < 0.05$.

的吸附率为 84.5%; 当 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 同时处理和 Cr^{3+} 单独处理时, 普通小球藻对 Cr^{3+} 的吸附率分别为 75.2% 和 81.6%, 由此可看出普通小球藻对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 单独存在时的吸附率高于 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 同时存在时的吸附率。这说明普通小球藻对单一重金属有更好的吸附效果, 复合重金属的存在使吸附率有所降低。

2.4 适宜条件下比较普通小球藻对复合 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率

研究普通小球藻在不同浓度、pH、温度以及单一及复合存在时对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附效果的影响, 结果均发现普通小球藻对 Cd^{2+} 的吸附率更高。筛选出普通小球藻吸附重金属 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的较优条件后, 比较 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 共存时其对 2 种重金属离子的吸附率。图 6 结果显示,

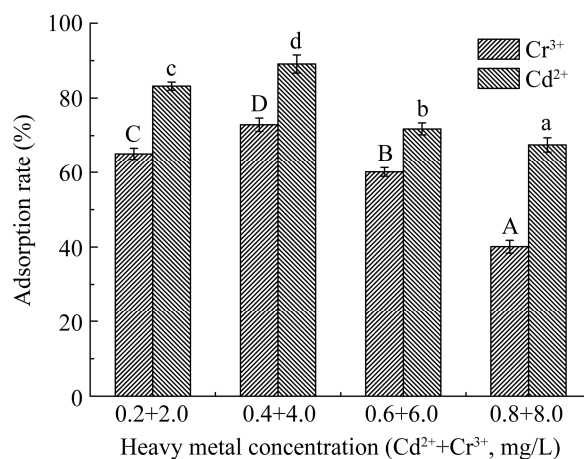


图6 复合 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 处理下普通小球藻对 Cd^{2+} 、 Cr^{3+} 的吸附率 浓度相同的适宜条件下普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率进行差异显著性分析, 差异显著用不同字母表示, $P < 0.05$

Figure 6 Adsorption rate of Cd^{2+} , Cr^{3+} by *Chlorella vulgaris* under compound Cd^{2+} and Cr^{3+} treatment. The adsorption rate of Cd^{2+} and Cr^{3+} by *C. vulgaris* under the same concentration and suitable conditions is analyzed for the significance of the difference, the significant difference is indicated by different letters, $P < 0.05$.

较优条件下, Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 复合存在时普通小球藻对 Cd^{2+} 的吸附率仍大于 Cr^{3+} 。这说明普通小球藻对重金属的吸附具有一定的选择性。

3 讨论

重金属进入环境后, 因其本身所具有的蓄积性和生物富集性等特性而不能自然降解^[22]。环境中的藻类与重金属离子有极强的亲和性, 所以多被用来吸附污染水中的重金属。藻类可以通过 2 种主要机制吸附金属离子, 其中一种与金属离子的配位、络合、离子交换、物理吸附和微沉淀有关, 这种机制(即生物蓄积)与生理因素无关, 只涉及藻类细胞结构和表面基团^[23-24]; 另一种金属吸附(即生物吸附)与藻类代谢有关, 在此期间金属离子储存在藻体内, 主要涉及表面络合、离子交换和氧化还原反应^[25-27]。微藻在与培养基接触 20 min 内可以吸附 90% 以上的重金属离子, 早期发生的快速吸附对应于生物蓄积, 占总吸附量的 80%–90%, 后期与活藻类的能量驱动代谢有关的吸附缓慢, 吸附率较低, 仅占被吸附总量的少数^[28]。利用藻类进行重金属的吸附处理水污染是近几年研究的热点, 而且已有大量研究表明藻细胞对多数单一重金属有极好的吸附效果。由于污染水体的复杂性质, 研究者们开始探究在 2 种甚至多种重金属存在的情况下对藻类进行重金属吸附效果的影响, 镉和铬是 2 种毒性大、难降解的重金属。因此, 本研究在先前的研究单一重金属毒性效应的基础上^[15-16], 将 2 种重金属复合加入到培养基中, 通过优化普通小球藻吸附 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 浓度、温度及 pH, 得出在温度 30 °C、pH 5.5 及 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的浓度为 0.4+4.0 mg/L 吸附效果最好, 这说明藻类对重金属的吸附受多种因素的影响, 合理地进行吸附条件的选择可提高藻细胞的吸附效率, 此结果支持了姜晶等^[29]的

研究。小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附均为吸热反应^[30-31]。温度较高时, 小球藻细胞表面的活性位点增多, 使得吸附率增高, 但温度过高会抑制小球藻的生长, 导致吸附率降低。这符合生物配体上的羧基等配位基团与金属阳离子形成配合物的过程是吸热过程的说法^[29]。Lin 等^[28]研究发现, 在中性或弱酸(4.0–7.5)条件下, 藻类对重金属的去除更有效, 本研究也得出了相同的结论。由于在弱酸条件下藻细胞表面更多的吸附基团暴露, 对于金属离子接近细胞表面并吸附在上面更有利。pH 值过低时, 藻细胞表面的羟基、羧基等官能团无法发生解离, H^+ 占据吸附位点, 斥力作用会阻碍金属离子结合在细胞表面, 而过高的 pH 值使得水中存在大量阴离子, 金属离子被这些阴离子包围, 形成负电基团, 也不利于藻细胞对金属的吸附^[29,32]。虽然在培养过程中 pH 值会逐渐升高, 但藻细胞能在较短的时间内吸附大量重金属离子, 之后吸附速率急剧下降, 吸附较为缓慢, 这种变化与藻类的代谢有关, 导致后期藻细胞的吸附率较低^[28]。因此, 初始 pH 值的大小在藻细胞吸附重金属的过程中具有重要意义。

有研究表明藻类对不同金属离子的吸附率不同。 Cr^{3+} 和 Zn^{2+} 被普通小球藻吸附具有明显的吸附效果, 而对其他金属离子的吸附效果则相对较弱^[33]。吴海锁等^[34]在探究普通小球藻对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 这 3 种重金属离子的吸附性实验中发现, 3 种金属离子只存在其中一种时, 普通小球藻对 Cd^{2+} 表现出更高的吸附率, 而 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 同时存在时吸附率表现为 $\text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$, 这说明对于不同重金属离子共同存在时普通小球藻的吸附因具有一定的选择性而表现出差异性。本实验研究结果也表明, 即使在优化浓度、pH 及温度后, 普通小球藻对 Cd^{2+} 吸附率仍高于 Cr^{3+} 。这是因为 2 种重

金属离子的半径相比 $\text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{3+}$, 而较大的半径更有利于金属离子结合较远的功能团; 其次, 两者的毒性为 $\text{Cd}^{2+} > \text{Cr}^{3+}$, 使得藻细胞对 Cd^{2+} 具有更强的亲和性, 因此对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附能力表现为前者更好, 由此可见普通小球藻对几种甚至多种重金属离子共同存在时的吸附具有选择性, 而且吸附能力与重金属自身的结构、功能团、离子半径的大小及毒性强弱都有一定的关系。

4 结论

(1) 普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 吸附的适宜条件是温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{pH } 5.5$ 及 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的浓度为 $0.4\text{--}4.0\text{ mg/L}$ 。在此条件下, 普通小球藻对重金属 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率分别高达 84.5% 和 75.2% 。

(2) 适宜条件下比较普通小球藻对 Cd^{2+} 和 Cr^{3+} 的吸附率发现, 普通小球藻对 Cd^{2+} 的吸附率明显高于对 Cr^{3+} 的吸附率。其原因可能是 Cd^{2+} 半径大于 Cr^{3+} 半径, Cd^{2+} 更有利于与较远的官能团结合, 说明重金属复合胁迫时, 普通小球藻对其吸附具有一定的选择性。

REFERENCES

- [1] 张晓. 中国水污染趋势与治理制度[J]. 中国软科学, 2014(10): 11-24
Zhang X. Trend of and the governance system for water pollution in China[J]. China Soft Science, 2014(10): 11-24 (in Chinese)
- [2] 高晓宁. 土壤重金属污染现状及修复技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2013(9): 229-231
Gao XN. Research advances on soil heavy metal pollution and remediation technology[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2013(9): 229-231 (in Chinese)
- [3] 陈璐璐, 周北海, 徐冰冰, 吴丰昌, 符志友. 太湖水体典型重金属镉和铬含量及其生态风险[J]. 生态学杂志, 2011, 30(10): 2290-2296
Chen LL, Zhou BH, Xu BB, Wu FC, Fu ZY. Cadmium and chromium concentrations and their ecological risks in the water body of Taihu Lake, East China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(10): 2290-2296 (in Chinese)
- [4] Nalatambi S. Determination of metals in tap water using atomic absorption spectrometry: a case study in bandar Sunway residential area[J]. Sunway Academic Journal, 2009, 6: 33-46
- [5] Ong C, Ibrahim S, Sen Gupta B. A survey of tap water quality in Kuala Lumpur[J]. Urban Water Journal, 2007, 4(1): 29-41
- [6] Tapia J, Vargas-Chacoff L, Bertrán C, Carrasco G, Torres F, Pinto R, Urzúa S, Valderrama A, Letelier L. Study of the content of cadmium, chromium and lead in bivalve molluscs of the Pacific Ocean (Maule Region, Chile)[J]. Food Chemistry, 2010, 121(3): 666-671
- [7] Elehinafe FB, Mamudu AO, Okedere OB, Ibitoye A. Risk assessment of chromium and cadmium emissions from the consumption of premium motor spirit (PMS) and automotive gas oil (AGO) in Nigeria[J]. Heliyon, 2020, 6(11): e05301
- [8] 王增焕, 林钦, 李刘冬, 王许诺. 大型海藻对重金属镉、铜的富集动力学研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 154-160
Wang ZH, Lin Q, Li LD, Wang XN. Kinetic study on the bioconcentration of cadmium and copper by large-sized seaweed *Gracilaria lemaneiformis*[J]. China Environmental Science, 2013, 33(1): 154-160 (in Chinese)
- [9] Gardea-Torresdey JL, Becker-Hapak MK, Hosea JM, Darnall DW. Effect of chemical modification of algal carboxyl groups on metal ion binding[J]. Environmental Science & Technology, 1990, 24(9): 1372-1378
- [10] Ferreira LS, Rodrigues MS, De Carvalho JCM, Lodi A, Finocchio E, Perego P, Converti A. Adsorption of Ni^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} onto dry biomass of *Arthrospira (Spirulina) platensis* and *Chlorella vulgaris*. I. Single metal systems[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 173(2): 326-333
- [11] Markou G, Mitrogiannis D, Çelekli A, Bozkurt H, Georgakakis D, Chrysikopoulos CV. Biosorption of Cu^{2+} and Ni^{2+} by *Arthrospira platensis* with different biochemical compositions[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 259: 806-813
- [12] Rodrigues MS, Ferreira LS, De Carvalho JCM, Lodi A, Finocchio E, Converti A. Metal biosorption onto dry biomass of *Arthrospira (Spirulina) platensis* and *Chlorella vulgaris*: multi-metal systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 217/218: 246-255
- [13] Edris G, Alhamed Y, Alzahrani A. Biosorption of

- cadmium and lead from aqueous solutions by *Chlorella vulgaris* biomass: equilibrium and kinetic study[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(1): 87-93
- [14] Nessim RB, Bassiouny AR, Zaki HR, Moawad MN, Kandeel KM. Biosorption of lead and cadmium using marine algae[J]. Chemistry and Ecology, 2011, 27(6): 579-594
- [15] 蒽玉琴, 任春燕, 朱巧巧, 杨红, 孙对兄. 响应面法优化小球藻吸附镉的条件[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2017, 53(4): 501-505
Xi YQ, Ren CY, Zhu QQ, Yang H, Sun DX. Optimized conditions of *Chlorella vulgaris* adsorbing cadmium by the response surface methodology[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2017, 53(4): 501-505 (in Chinese)
- [16] 蒽玉琴, 任春燕, 朱巧巧, 崇梅, 杨红, 孙对兄. Cr³⁺胁迫对小球藻生理生化特性的影响[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(1): 228-233
Xi YQ, Ren CY, Zhu QQ, Chong M, Yang H, Sun DX. The effect of Cr³⁺ stress on physiological and biochemical characteristics of *Chlorella vulgaris*[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, 12(1): 228-233 (in Chinese)
- [17] 朱巧巧. 小球藻吸附镉(Cd)的条件及在镉胁迫下的生理生化特性的研究[D]. 兰州: 西北师范大学硕士学位论文, 2016
Zhu QQ. The study of the condition of *Chlorella vulgaris* absorbing cadmium and the physiological and biochemical characteristics of it under cadmium stress[D]. Lanzhou: Master's Thesis of Northwest Normal University, 2016 (in Chinese)
- [18] Sodango TH, Li XM, Sha JM, Bao ZC. Review of the spatial distribution, source and extent of heavy metal pollution of soil in China: impacts and mitigation approaches[J]. Journal of Health & Pollution, 2018, 8(17): 53-70
- [19] Walsby AE. Microalgae: biotechnology and microbiology[J]. Experimental Agriculture, 1995, 31(1): 112
- [20] Khambhaty Y, Mody K, Basha S, Jha B. Biosorption of Cr(VI) onto marine *Aspergillus niger*: experimental studies and pseudo-second order kinetics[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2009, 25(8): 1413-1421
- [21] Guibal E, Saucedo I, Roussy J, Le Cloirec P. Uptake of uranyl ions by new sorbing polymers: discussion of adsorption isotherms and pH effect[J]. Reactive Polymers, 1994, 23(2/3): 147-156
- [22] 吉米拉木·加马力, 古海尼沙·买买提, 艾尼瓦尔·吐米尔. 3种地衣体内藻类对4种重金属离子的耐受能力及其吸附特性研究[J]. 西北植物学报, 2019, 39(7): 1230-1240
Jiamali Ji, Maimaiti G, Tumier A. Study on characteristics of tolerance and absorption of four heavy metals by three photobionts[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2019, 39(7): 1230-1240 (in Chinese)
- [23] Davis TA, Volesky B, Mucci A. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae[J]. Water Research, 2003, 37(18): 4311-4330
- [24] 周文彬, 邱保胜. 藻类对重金属的耐性与解毒机理[J]. 湖泊科学, 2004, 16(3): 265-272
Zhou WB, Qiu BS. Mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance in algae[J]. Journal of Lake Science, 2004, 16(3): 265-272 (in Chinese)
- [25] Wang JL, Chen C. Biosorbents for heavy metals removal and their future[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27(2): 195-226
- [26] Anastopoulos I, Kyzas GZ. Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae[J]. Journal of Molecular Liquids, 2015, 209: 77-86
- [27] Suresh Kumar K, Dahms HU, Won EJ, Lee JS, Shin KH. Microalgae: a promising tool for heavy metal remediation[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113: 329-352
- [28] Lin ZY, Li J, Luan YN, Dai W. Application of algae for heavy metal adsorption: a 20-year meta-analysis[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 190: 110089
- [29] 姜晶, 李亮, 李海鹏, 李非里. 蛋白核小球藻对 Pb(II) 和 Cd(II)的生物吸附及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 1995-2003
Jiang J, Li L, Li HP, Li FL. Biosorption of lead(II) and cadmium(II) from aqueous solution by *Chlorella pyrenoidosa* and its influential factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 1995-2003 (in Chinese)
- [30] Sağ Y, Kutsal T. Determination of the biosorption heats of heavy metal ions on *Zoogloea ramigera* and *Rhizopus arrhizus*[J]. Biochemical Engineering Journal, 2000, 6(2): 145-151
- [31] Aksu Z. Equilibrium and kinetic modelling of

- cadmium(II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: effect of temperature[J]. *Separation and Purification Technology*, 2001, 21(3): 285-294
- [32] 邓莉萍, 苏莹莹, 苏华, 王新亭, 朱校斌. 大型海藻吸附水体中重金属离子的机理及影响因素[J]. *海洋科学*, 2008, 32(8): 91-97
- Deng LP, Su YY, Su H, Wang XT, Zhu XB. Mechanism and influence factors of biosorption heavy metal ions by macroalgae[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(8): 91-97 (in Chinese)
- [33] 吴能表, 付启昌, 龙云, 阳义健, 朱利泉, 王小佳. 不同小球藻对工业废水中金属离子吸附能力比较[J]. *西南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 27(1): 111-113
- Wu NB, Fu QC, Long Y, Yang YJ, Zhu LQ, Wang XJ. Comparison of the ability to absorb metallic ions in wastewater by different strains of *Chlorella*[J]. *Journal of Southwest Agricultural University Natural Sciences*, 2005, 27(1): 111-113 (in Chinese)
- [34] 吴海锁, 张洪玲, 张爱茜, 王连生, 王连军. 小球藻吸附重金属离子的试验研究[J]. *环境化学*, 2004, 23(2): 173-177
- Wu HS, Zhang HL, Zhang AQ, Wang LS, Wang LJ. Biosorption of heavy metals by *Chlorella*[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(2): 173-177 (in Chinese)

征 稿 简 则

1 刊物简介与刊登内容

《微生物学通报》是由中国科学院微生物研究所和中国微生物学会主办,以微生物学基础研究及技术创新与应用为主的综合性学术期刊。本刊为月刊,为中文核心期刊、中国科技核心期刊、CSCD 核心期刊,曾获国家优秀科技期刊三等奖,中国科学院优秀科技期刊三等奖,并在新闻出版署设立的“中国期刊方阵”中被列为“双效”期刊。从 2012 年至今,本刊以国内“微生物、病毒学类期刊”综合评价总分第一而蝉联“百种中国杰出学术期刊”称号,而且入选 300 种“中国精品科技期刊”,成为“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。

本刊刊登内容包括:工业、海洋、环境、基础、农业、食品、兽医、水生、药物、医学微生物学和微生物蛋白质组学、功能基因组、工程与药物等领域的最新研究成果、产业化新技术和新进展,以及微生物学教学研究改革等。设置的栏目有:研究报告、专论与综述、生物实验室、高校教改纵横、专栏等。

2 投稿方式

投稿时请登陆我刊主页 <http://journals.im.ac.cn/wwxtbcn>, 点击作者投稿区,第一次投稿请先注册,获得用户名和密码,然后依照提示提交稿件,详见主页“投稿须知”。

3 写作要求

3.1 来稿要求论点明确,数据可靠,简明通顺,重点突出。

3.2 英文摘要写作注意事项:(1) 建议使用第一人称,以此可区分研究结果是引用文献还是作者所得;(2) 建议用主动语态,被动语态表达拖拉模糊,尽量不用,这样可以避免长句,以求简单清晰;(3) 建议使用过去时态,要求语法正确,句子通顺;(4) 英文摘要的内容应与中文摘要一致,但可比中文摘要更详尽,写完后务必请英文较好且专业知识强的专家审阅定稿后再投稿;(5) 摘要中不要使用缩写语,除非是人人皆知的,如:DNA、ATP 等;(6) 在英文摘要中不要使用中文字体标点符号。

3.3 关键词:应明确、具体,一些模糊、笼统的词语最好不用,如“基因”“表达”等。

3.4 脚注(正文首页下方):

基金项目: 基金项目(编号)

Supported by:

*Corresponding author: E-mail:

Received: 20xx-xx-xx; Accepted: 20xx-xx-xx; Published online: 20xx-xx-xx

(下转 p.87)