

# 海黍子和脆江蒿对重金属锌、镉富集的比较研究

吕芳<sup>1,2</sup>, 丁刚<sup>1,3</sup>, 吴海一<sup>1,2</sup>, 李美真<sup>1</sup>

(1. 山东省海洋生物研究院, 山东 青岛 266002; 2. 青岛市大型海藻工程技术研究中心, 山东 青岛 266002; 3. 山东省海水健康养殖工程技术研究中心, 山东 青岛 266002)

**摘要:** 采用室内培养实验方法, 研究了褐藻海黍子(*Sargassum muticum*)和红藻脆江蒿(*Gracilaria chouae*)在不同质量浓度的锌和镉溶液里 15 d, 藻体的生长和体内金属离子含量的变化。结果表明: 两种藻的生长速率与暴露溶液金属质量浓度呈负相关, 藻体内积累金属离子的量和溶液的金属质量浓度呈正相关, 藻体内金属离子的含量均在培养 3 d 后显著增加, 且随着培养时间的延长而持续增加。海黍子和脆江蒿对重金属  $Zn^{2+}$  的富集能力明显高于对  $Cd^{2+}$  的富集能力, 在相同条件下, 海黍子对重金属  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  的积累量明显高于脆江蒿。以上研究结果对利用藻类修复重金属污染的海洋水体能起到一定的指导和参考作用。

**关键词:** 海黍子(*Sargassum muticum*); 脆江蒿(*Gracilaria chouae*); 重金属; 生物修复

中图分类号: X506 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)01-0018-06

DOI: 10.11759/hyxx20150205004

藻类作为海洋生态系统中重要的初级生产者, 不仅可以去除 N、P 等营养物质和有机污染物, 还可以吸附海洋中的重金属, 因此可应用于海洋生态系统中的重金属污染修复<sup>[1-4]</sup>。

研究表明, 大型海藻对多种重金属的吸附表现出较强的能力。孔石莼(*Ulva pertusa*)对铜和镉具有较强的吸收能力<sup>[5]</sup>; 鼠尾藻(*Sargassum thunbergii*)对海水中重金属锌、镉的积累量与海水中重金属浓度及处理时间呈正相关, 并且对锌具有较强的富集能力<sup>[6]</sup>; 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)对水体中重金属铅具有较好的去除<sup>[7]</sup>; 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)对铜和镉有较强的富集能力<sup>[8]</sup>, 并且不同 N、P 营养盐浓度条件会影响龙须菜对重金属胁迫的耐受性<sup>[9]</sup>。以上研究发现不同海藻对重金属的富集能力差别很大, 其生理机制较为复杂, 需要更多系统深入的研究。

本文研究了海黍子和脆江蒿在对重金属锌和镉的富集过程中, 藻体的生长和体内金属离子含量的变化规律, 目的在于探讨不同藻类对重金属离子的富集能力, 以期为高效富集重金属的海藻筛选提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验材料

海黍子采自山东荣成市海域, 脆江蒿采自青岛

胶南人工养殖池塘。采集的藻体用低温采集箱运回实验室, 用海水反复清洗去除泥沙及杂质后, 置于温度 15℃, 光照 1 000 lx 的恒温光照培养箱中充气培养, 5 d 后用于实验。选取生长健壮、形态较一致的个体用于实验。

### 1.2 实验方法

两种重金属离子溶液分别用分析纯  $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$  和  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  配制而成。实验中金属离子质量浓度参照吴海一等<sup>[6]</sup>设为 0.1、0.5、1.0、5.0 mg/L, 以自然海水作为对照。

实验在容积为 3000 mL 的烧杯中进行, 每个烧杯装 2 000 mL 溶液。每个实验处理组设置 3 个重复,

收稿日期: 2016-05-22; 修回日期: 2016-07-07

基金项目: 山东省优秀中青年科研奖励基金项目(BS2012HZ013); 国家自然科学基金项目(41306122); 国家海洋公益行业科研专项经费项目(201305021、201405040、201505022); 山东省现代农业产业技术体系建设专项资金(SDAIT-26)

[Foundation: Young and Middle-Aged Scientists Research Awards Fund of Shandong province, No.BS2012HZ013; National Natural Science Foundation of China, No.41306122; National Marine Public Welfare Research Project, No.201305021, 201405040, 201505022; The earmarked fund for Modern Agro-industry Technology Research System in Shandong Province, No. SDAIT-26]

作者简介: 吕芳(1982-), 女, 山东青岛人, 助理研究员, 博士, 主要从事藻类生理生态学与分子生物学的研究, 电话: 0532-82685722, E-mail: lvfang8254@163.com; 吴海一(1973-), 通信作者, 男, 山东莒南人, 副研究员, 博士, 主要从事大型海藻生态学研究, 电话 0532-82685722, E-mail: wuhaiyi1997@163.com

每个重复放置 15 株藻体。实验在盐度为 30、温度为 15℃、光周期为 12 h : 12 h、光照强度为 3 000 lx 的恒温光照培养箱内充气进行, 每天更换溶液。

### 1.3 比生长速率的测定

在实验开始后的第 3、5、10、15 天, 记录藻体的质量变化, 称量后及时将藻体转移入培养水体中, 防止藻体水分的过度流失。

比生长速率( $R_{GR}$ )的计算公式如下:

$$R_{GR} = [(W_t/W_0)^{1/t} - 1] \times 100$$

式中,  $W_t$  为实验中期或结束时藻体鲜质量(g),  $W_0$  为实验开始时藻体鲜质量(g),  $t$  为培养时间(d)。

### 1.4 藻体内金属含量的测定

在实验开始后的第 0、3、5、10、15 天, 从每个重复组中随机取 1 株藻体测定藻体内金属离子含量。将样品在 60℃ 下烘干至恒质量, 用天平准确称取烘干的样品 10mg, 测定时采用湿法消解, 将消化好的溶液放入 4℃ 冰箱保存待测。金属含量采用火焰原子

吸收分光光度法测定。

### 1.5 数据分析

所得数值以平均值±标准误差表示。显著性差异用单因素方差分析来分析, 分析软件为 SPSS 13.0, 当  $P < 0.05$  时为显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 重金属 $Zn^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 对藻体生长的影响

如图 1 所示, 海黍子暴露在  $Zn^{2+}$  溶液时, 各个实验组藻体的生物量均呈上升趋势, 且在实验前 5d 内比生长速率逐渐增加( $P < 0.05$ ), 然后急剧下降。在不同  $Zn^{2+}$  浓度下海黍子的比生长速率呈现差异性, 低浓度下生长较快, 高浓度( $>1.0$  mg/L)下生长速率较慢。当海黍子暴露在不同质量浓度  $Cd^{2+}$  溶液时, 比生长速率的变化与暴露在  $Zn^{2+}$  溶液里变化相似, 但是 3~5 d 各实验组的生长速率显著高于其他暴露时间 ( $P < 0.05$ )。

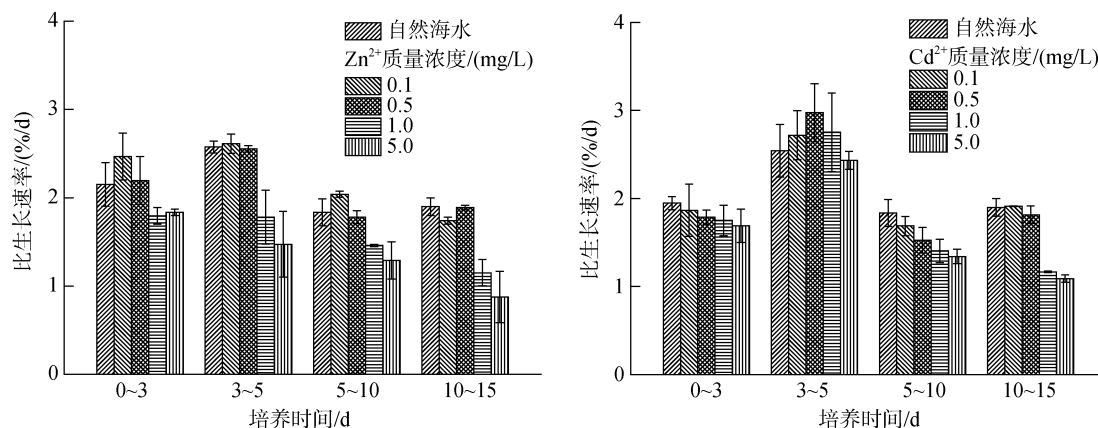


图 1 海黍子暴露在重金属溶液里的比生长速率

Fig. 1 Specific growth rate of *Sargassum muticum* during heavy metal exposure

由图 2 可见, 当脆江蓠暴露在  $Zn^{2+}$  溶液时, 实验前 5 d 内藻体比生长速度比较快, 无明显的滞缓期, 随后随着培养时间的延长, 生长速率缓慢下降。 $Zn^{2+}$  质量浓度 0.1 mg/L 和 0.5 mg/L 的处理组, 藻体的生长速率高于对照组。另外, 脆江蓠的生长速率与暴露溶液质量浓度呈负相关, 低浓度下脆江蓠的比生长速率显著高于高浓度( $>1.0$  mg/L)下的生长速率。脆江蓠在  $Zn^{2+}$  溶液中的生长速率呈现相似的变化趋势。

### 2.2 海黍子对重金属 $Zn^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 的富集

实验用自然海水中  $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的质量浓度分别是 21.52  $\mu\text{g/L}$  和 1.11  $\mu\text{g/L}$ 。由图 3 可见, 在自然海

水中培养的海黍子藻体内  $Zn^{2+}$  含量在实验期间没有明显变化, 而其他重金属处理组藻体内  $Zn^{2+}$  含量均在 3 d 后显著增加( $P < 0.05$ ), 且随着培养时间的延长, 藻体内  $Zn^{2+}$  含量逐渐增加。

当海黍子暴露在不同质量浓度  $Cd^{2+}$  溶液时, 体内  $Cd^{2+}$  含量变化与暴露在  $Zn^{2+}$  溶液呈现相同的变化趋势, 在 3 d 后显著增加而后持续升高。

### 2.3 脆江蓠对重金属 $Zn^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 的富集

如图 4 所示, 重金属  $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  分别处理下的脆江蓠, 体内金属离子含量变化均随着暴露时间的延长呈逐渐增加的趋势, 且不同重金属离子浓度处

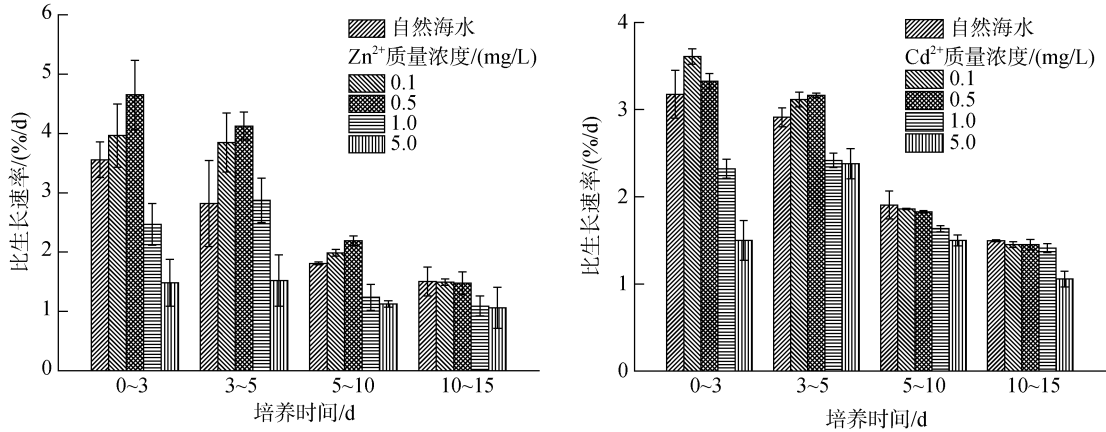


图 2 脆江莠暴露在重金属溶液里的比生长速率

Fig. 2 Specific growth rate of *Gracilariachouae* during heavy metal exposure

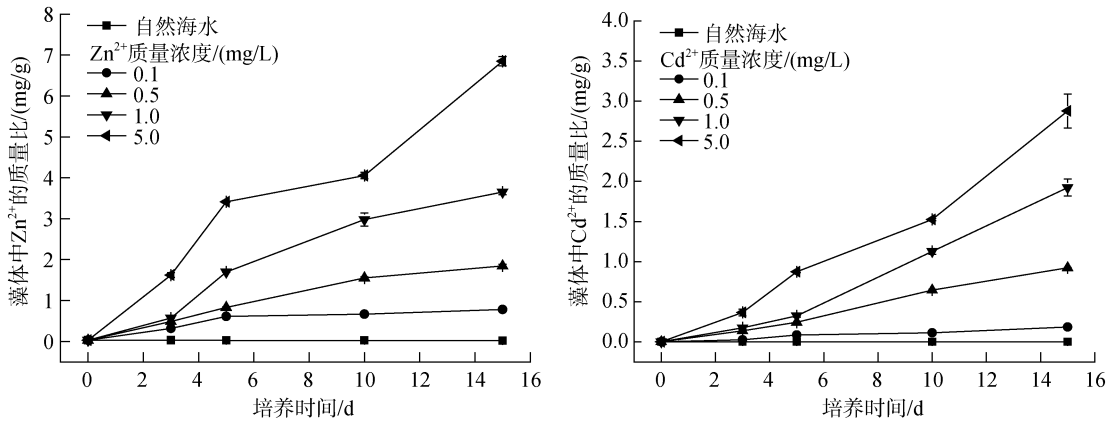


图 3 海黍子在重金属溶液中培养 15 d 富集重金属离子的量

Fig. 3 Metal ion accumulation in *Sargassum muticum* during heavy metal exposure for 15 days

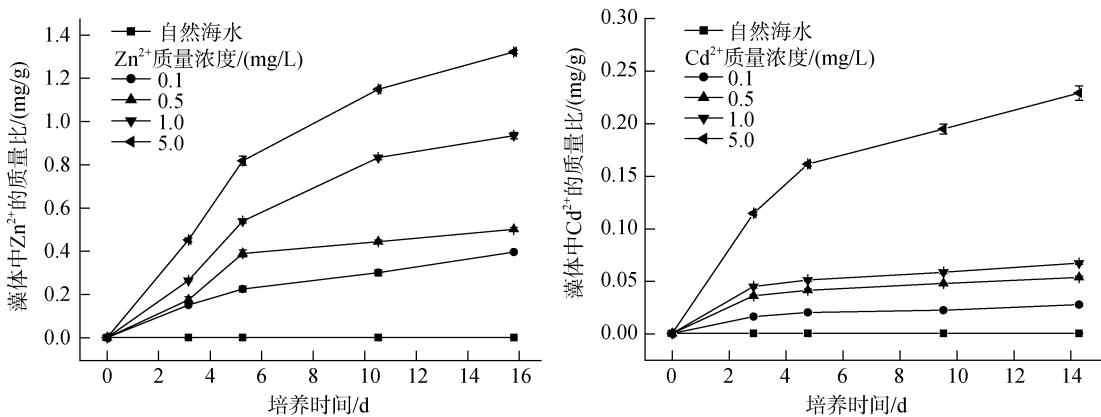


图 4 脆江莠在重金属溶液中培养 15d 富集重金属离子的量

Fig. 4 Metal ion accumulation in *Gracilaria chouae* during heavy metal exposure for 15 days

理组之间差异显著( $P < 0.05$ ), 暴露质量浓度越高, 藻体内金属离子含量也越大。

### 3 讨论

海黍子(*Sargassum muticum*)是多年生大型褐藻,

广泛分布于我国北方黄渤海沿岸。藻体长 1m 以上, 有的可达 2~4 m。藻体可以从海底到海面漂生长, 往往在海浪较小的内湾和浅海区的海底岩礁上形成较大的藻场, 是我国北方沿海重要的海藻资源之一<sup>[10-11]</sup>。脆江莠 *Gracilaria chouae*(Zhang et, Xia)是暖水性大型

经济红藻, 在夏季高温期, 藻体也能快速生长, 填补了北方海区夏季池塘无大型海藻养殖的空白<sup>[12]</sup>, 在优化近海海域生态系统结构、参与全球碳循环、防治海区富营养化和赤潮等方面都有重要的生态作用<sup>[13-15]</sup>。

本实验观察发现, 脆江蓠在低浓度  $Zn^{2+}$  海水中, 藻体生长旺盛, 分枝繁茂整齐, 体色呈深红褐色, 而在高浓度  $Zn^{2+}$  海水中, 脆江蓠生长缓慢, 藻体瘦弱短小, 主枝成浅褐色, 侧枝少且呈黄褐色, 实验 15 d 时部分侧枝出现腐烂衰退的现象。以上结果表明, 在不同重金属离子浓度的影响下, 藻类的生长呈现差异性。这很大程度上是由于随着吸附时间的推移, 藻类受到有毒高浓度重金属的胁迫, 新陈代谢受到了抑制, 藻细胞开始衰退甚至死亡<sup>[16-18]</sup>。在细胞内部, 重金属离子能够替换活性金属或键合巯基、氨基和羧基集团而使某些必须酶失去活性<sup>[19]</sup>, 从而制约了细胞的生长代谢。

同一藻类可以吸附不同的重金属离子但吸附能力差别很大。从图 3 和图 4 可以看出, 海黍子分别暴露在 4 种相同质量浓度  $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  溶液 15 d 时, 每克干重藻体内  $Zn^{2+}$  的含量分别增加了 1.59、3.38、4.03、6.82 mg,  $Cd^{2+}$  的含量分别增加了 0.37、0.87、1.52、2.88 mg; 脆江蓠藻体内  $Zn^{2+}$  的含量分别增加了 0.43、0.78、1.09、1.26 mg,  $Cd^{2+}$  的含量分别增加了 0.11、0.16、0.19、0.23 mg。这些数据表明: 海黍子和脆江蓠对重金属  $Zn^{2+}$  的富集能力明显高于对  $Cd^{2+}$  的富集能力, 其原因一方面可能是与藻体本身的细胞化学组成和生理状态有关<sup>[20-22]</sup>, 另一方面可能是因为锌元素是植物生长的必须元素, 这也间接说明了所测重金属元素对藻类的毒性强度和藻类对不同重金属元素的耐受性<sup>[23-24]</sup>。

不同的藻类对于同一重金属元素的富集能力也有很大差别。实验结果表明, 海黍子对重金属  $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的积累量明显高于脆江蓠, 在  $Zn^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  质量浓度为 5.0 mg/L 的溶液中分别暴露 15 d 后, 海黍子  $Cd^{2+}$  的积累量为 2.88 mg/g,  $Zn^{2+}$  的积累量为 6.85 mg/g, 约为相同实验条件下脆江蓠  $Cd^{2+}$  积累量的 12.5 倍,  $Zn^{2+}$  的 5.45 倍。因此对重金属具有较强富集能力的藻类的筛选, 同时有较强的重金属耐受性及较大的生物量, 实际应用时需根据水体中重金属水平选择相应耐受性的藻类, 避免藻类受重金属毒性作用引起的生长抑制<sup>[24-25]</sup>。

利用藻类修复海洋重金属污染, 既能有效的减轻环境污染, 又能使藻类资源得到充分利用, 具有

重要的实用和经济价值。但现阶段由于不同藻类与金属种类的对应处理关系尚没有形成明确的标准体系, 在应用中无法准确选择藻类种类, 在一定程度上制约了该技术的发展与应用, 因此筛选环境适应性强和对重金属富集能力强的海藻品种, 仍是亟需解决的问题。

#### 参考文献:

- [1] Matheickal J T, Yu Q. Biosorption of lead from aqueous solution by marine alga *Ecklonia radita*[J]. *WatSci Tech*, 1996, 34: 1-7.
- [2] Holan Z R, Volesky B, Prasetyo I. Biosorption of cadmium by biomass of marine algae[J]. *Biotech Bioeng*, 1993, 41: 819-825.
- [3] 尹平河, 赵玲, YU Qiming, 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 Pinghe, Zhao Ling, YU Qiming, et al. Biosorption of lead, copper and cadmium by marine macro algae[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(3): 11-15.
- [4] 江用彬, 季宏兵. 藻类对重金属污染水体的生物修复[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 56-67.  
Jiang Yongbin, Ji Hongbing. Bioremediation of heavy metal contaminated water by algae[J]. *Progress in Geography*, 2007, 26(1): 56-67.
- [5] 魏海峰, 刘长发, 张俊新, 等. 孔石莼(*Ulva pertusa*) 对铅、铜、镉的吸收[J]. *环境科学与管理*, 2008, 33: 51-53.  
Wei Haifeng, Liu Changfa, Zhang Junxin, et al. The uptake of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  by *Ulva pertusa*[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33: 51-53.
- [6] 吴海一, 詹冬梅, 刘洪军, 等. 鼠尾藻对重金属锌、镉富集及排放作用的研究[J]. *海洋科学*, 2010, 34(1): 69-74.  
Wu Haiyi, Zhan Dongmei, Liu Hongjun, et al. Study on accumulation and degradation of heavy metals by the Brown alga *Sargassum thunbergii*[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(1): 69-74.
- [7] 朱明, 郭赣林, 刘兆普, 等. 浒苔对重金属  $Pb^{2+}$  的生物吸附及其生理反应[J]. *水产科学*, 2011, 30: 681-684.  
Zhu Ming, Guo Ganlin, Liu Zhaopu, et al. Bioabsorption of  $Pb^{2+}$  and physiological responses in green alga *Enteromorpha prolifera*[J]. *Fisheries Science*, 2011, 30: 681-684.
- [8] 王增焕, 王许诺, 林钦, 等. 龙须菜对铜、镉的富集特征[J]. *水产学报*, 2011, 35: 1233-1239.  
Wang Zenghuan, Wang Xunuo, Lin Qin, et al. Accumulation characteristics for copper and cadmium by *Gracilaria lemaneiformis*[J]. *Journal of Fisheries of*

- China, 2011, 35: 1233-1239.
- [9] 张皓, 黄鹤忠, 何华敏, 等. 不同 N、P 浓度条件下龙须菜对镉胁迫的生理响应[J]. 海洋科学, 2009, 5: 74-79.  
Zhang Hao, Huang Hezhong, HE Huamin, et al. Physiological response of *Gracilaria lemaneiformis* to stress of heavy metals Cd<sup>2+</sup> under the conditions of different nitrogen and phosphorus[J]. Marine Sciences, 2009, 5: 74-79.
- [10] 钱树本, 刘东艳, 孙军. 海藻学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 452-459.  
Qian Shuben, Liu Dongyan, Sun Jun. Marine Phycology[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2005: 452-459.
- [11] 曹淑青, 张泽宇, 王国书, 等. 海黍子室内人工育苗技术的研究[J]. 大连水产学院学报, 2008, 5: 359-363.  
Cao Shuqing, Zhang Zeyu, Wang Guoshu et al. Indoor artificial seeding of seaweed *Sargassum muticum*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2008, 5: 359-363.
- [12] 胡凡光, 王志刚, 王翔宇, 等. 脆江蓠池塘栽培技术[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(5): 67-73.  
Hu Fanguang, Wang Zhigang, Wang Xiangyu, et al. Studies on pond cultivation techniques of *Gracilaria bursapastoris*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(5): 67-73.
- [13] 汤坤贤, 袁东星, 林泗彬, 等. 江蓠对赤潮消亡及主要水质指标的影响[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 24-27.  
Tang Kunxian, Yuan Dongxing, Lin Sibin, et al. Depression and affect of red tide on main water quality index by *Gracilaria tenuistipitata*[J]. Marine Environmental Science, 2003, 22(2): 24-27.
- [14] 何培民. 海藻生物技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.  
He Peimin. Seaweed biological technology and application[M]. Beijing: Chemical industry press, 2007.
- [15] 申华. 江蓠对水体重金属铅、镍的生物修复效果及其生理适应性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2008.  
Shen Hua. Study on bioremediation effects of lead, nickel from aqueous solutions by *Gracilaria tenuistipitata* and its physiological response[D]. Suzhou: Suzhou University, 2008.
- [16] Howlett N G, Aveiy S V. Induction of lipid peroxidation during heavy metal stress in *Saccharomyces cerevisiae* and influence of plasma membrane fatty acid unsaturation[J]. Appl Environ Microb, 1997, 63(8): 2971-2976.
- [17] 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(8): 1782-1794.  
Zhi Tiantian, Cheng Lihua, Xu Xinhua, et al. Advance on heavy metals removal from aqueous solution by algae[J]. Progress in Chemistry, 2011(8): 1782-1794.
- [18] 王帅, 梁英, 冯力霞, 等. 重金属胁迫对杜氏盐藻生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 海洋科学, 2010, 10: 38-48.  
Wang Shuai, Liang Ying, Feng Lixia, et al. Effects of heavy metal exposure on the growth and chlorophyll fluorescence of *Dunaliella salina*[J]. Marine Sciences, 2010, 10: 38-48.
- [19] Bligh EG, Dyer WJ. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. Can J Biochem Physiol, 1959, 37(8): 911-917.
- [20] Davis T A, Lanes F, Volesky B, et al. H-NMR study of Na alginates extracted from *Sargassum* sp. in relation to metal biosorption[J]. Appl Biotechnol, 2003, 110 (2): 75-90.
- [21] Yun Y S, Volesky B E. Modeling of lithium interference in cadmium biosorption[J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(16): 361-368.
- [22] 陆开彤, 唐建军, 蒋德安. 藻类富集重金属的特点及其应用展望[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 118-122.  
Lu Kaixing, Tang Jianjun, Jiang De'an. Characteristics of heavy metals enrichment in algae and its application prospects [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(1): 118-122.
- [23] 邓莉萍, 苏营营, 苏华, 等. 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, 8: 91-97.  
Deng Liping, Su Yingying, Su Hua, et al. Mechanism and influence factors of biosorption heavy metal ions by macroalgae[J]. Marine Sciences, 2008, 8: 91-97.
- [24] Schiewer S, Wong M H. 2000. Ionic strength effect in biosorption of metals by marine algae[J]. Chemosphere, 41(1-2): 271-282.
- [25] 王一兵, 柯珂, 张荣灿, 等. 海藻生物吸附重金属研究现状及展望[J]. 海洋科学进展, 2013, 4: 574-582.  
Wang Yibing, Ke Ke, Zhang Rongcan, et al. Present study and perspective of heavy metal biosorption on marine algae[J]. Advances in Marine Science, 2013, 4: 574-582.

## Comparative study on heavy metal accumulation in *Sargassum muticum* and *Gracilaria chouae*

LÜ Fang<sup>1, 2</sup>, DIND Gang<sup>1, 3</sup>, WU Hai-yi<sup>1, 2</sup>, LI Mei-zhen<sup>1</sup>

(1. Marine Biology Institute of Shandong Province, Qingdao 266002, China; 2. Qingdao Macroalgae Engineering Technology Research Center, Qingdao 266002, China; 3. Engineering Research Center of Healthy Marine Aquaculture, Shandong province, Qingdao 266002, China)

**Received:** May 22, 2016

**Key words:** *Sargassum muticum*; *Gracilaria chouae*; heavy metals; bioremediation

**Abstract:** The growth and accumulation of the heavy metals Zn and Cd in *Sargassum muticum* and *Gracilaria chouae* were investigated for 15 days following exposure to different concentrations of these metals. The results demonstrated that the growth rates of these two algae were negatively correlated to the concentrations of metal solutions, whereas the metal contents *in vivo* were positively correlated to the concentrations of metal solutions. In addition, the metal contents in both algae increased remarkably on the third day of culture and continually kept increasing over the entire period of culture. The accumulation of Zn<sup>2+</sup> was evidently higher than that of Cd<sup>2+</sup> in both algae. Under the same experimental conditions, the accumulation of Zn<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup> was significantly higher in *S. muticum* than in *G. chouae*. These findings may contribute to the selection of potential algae for the removal of heavy metals in aquatic environments.

(本文编辑: 梁德海)