

龙须菜对铜、镉的富集特征

王增焕*, 王许诺, 林钦, 李刘冬

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 通过以人工培育的龙须菜在低浓度 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 污染水体中对铜(Cu)、镉(Cd)富集与释放的模拟实验,探索龙须菜对Cu、Cd污染水体的修复作用。富集实验结果表明,龙须菜对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 有较强的富集能力,龙须菜中Cu、Cd的含量与水体中 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的浓度以及暴露时间呈显著正相关关系。在 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 共存的环境中,龙须菜Cu、Cd的含量均比 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 单独存在的环境中高。应用双箱模型,对富集和释放实验的数据进行拟合,得到龙须菜富集 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的速率常数和释放速率常数。拟合结果显示,龙须菜对Cu的富集能力高于对Cd的富集能力。龙须菜的富集能力随水体中 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度的升高而降低。释放实验结果表明,离子交换和络合是龙须菜富集 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的重要途径,被龙须菜吸附的 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 通过解吸能重新被释放。

关键词: 龙须菜; 铜; 镉; 生物富集

中图分类号: Q 946; S 917

文献标志码: A

藻类是海洋生态系统的初级生产者,在食物链中起重要作用。藻类对重金属有较强的富集能力,利用海藻对重金属的富集能力,可以进行污水处理及水质净化^[1]。由于活体海藻生长易受有毒物质影响,处理周期长,目前利用海藻修复水体重金属污染,主要是将海藻制成生物吸附剂,对其吸附机理、吸附容量及影响条件等进行了研究^[2-4]。

龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)是红藻门(Rhodophyta)江蓠属(*Gracilaria*)中一种重要的大型经济海藻,原产于山东和辽宁,目前已在浙江、福建两省以及广东南澳开始养殖。龙须菜具有适应性广、生长快速等特性,在生长过程中可大量吸收碳、氮、磷等生源要素^[5-6],成为养殖污染海域修复的研究热点^[7-9]。铜(Cu)是藻类必需的微量元素,但高浓度的Cu可以对藻类的生理活动造成显著影响^[9];镉(Cd)是一种非必需的、有毒元素,可沿食物链转移、蓄积,在人体内的半衰期长达数十年。随着社会经济和工农业生产的快速发展,海洋环境受到Cu、Cd的污染,而且通

过食物链,对人类的健康产生危害。本实验研究了低浓度 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 环境下,活体龙须菜对Cu、Cd的累积特征,为龙须菜对重金属Cu、Cd污染水体的净化及修复应用提供基础资料。

1 材料与方法

龙须菜为室内人工培育,选取健康、大小均匀的藻体用于实验。为保证实验过程中龙须菜稳定生长,实验前于水族箱内暂养20 d,水温(21 ± 1) °C、盐度30。实验所用 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 分别用标准溶液(GSB G 62040-90)稀释而成。实验中 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 质量浓度参考《中华人民共和国海水水质标准》(GB 3097-1997)设置。 Cd^{2+} 设4个浓度,分别为1、5、10和20 $\mu\text{g/L}$; Cu^{2+} 设4个浓度,分别为5、10、20和50 $\mu\text{g/L}$,均以纯水配置空白人工海水作为对照。

Cd、Cu共存条件下的富集实验,在 Cu^{2+} 单独存在的4个浓度实验组中各加入浓度为10 $\mu\text{g/L}$ 的 Cd^{2+} ,分别以 Cu^{2+} 单独存在时的4个浓度组为

收稿日期:2011-02-14 修回日期:2011-04-07

资助项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2009TS07,2009TS20)

通讯作者:王增焕,E-mail:zh-wang@people.com.cn

Cu 的对照组,以浓度为 10 $\mu\text{g/L}$ 的 Cd 对照组。

实验在容积为 30 L 的水族箱进行,每个水族箱装 22 L 人工海水,盐度 30、温度 $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。富集实验持续 28 d,在实验的第 3、7、14、21、28 天,从水族箱里随机抽取 3 份适量龙须菜样品,用于测定 Cu、Cd 的含量。经过 28 d 富集实验后的龙须菜,转移到空白海水中进行释放实验,释放实验持续 28 d,龙须菜样品采集方法与富集实验相同。

龙须菜样品于 60°C 烘干、研磨。准确称取 $0.7\text{ g} (\pm 0.001\text{ g})$ 样品,采用湿消解、用原子吸收光谱法进行测定。样品的前处理与测定方法参照《食品卫生检验方法理化部分》(GB/T 5009 - 2003)规定操作进行,所用仪器为日立 Z-2000 型塞曼效应原子吸收分光光度计。龙须菜中 Cd、Cu 的质量分数(含量)以干重表示。

数据采用 SPSS 软件进行统计分析,图形采用 Grapher 软件绘制。

2 结果

2.1 龙须菜对 Cu、Cd 的富集与释放

龙须菜对 Cu、Cd 的富集和释放实验结果如图 1 所示。随暴露时间、暴露浓度的增加,龙须菜中 Cu、Cd 的含量逐渐升高。相关分析结果表明,龙须菜中 Cu、Cd 的含量与暴露浓度、暴露时间均呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)。与对照组相比,从第 3 天开始,4 个实验组龙须菜 Cu、Cd 含量明显高于对照组 ($P < 0.05$)。

在释放阶段中,龙须菜中 Cu、Cd 的含量随时间增加而逐渐降低。在释放实验结束时,4 个实验组龙须菜 Cu 的含量分别降低了 35.80%、43.03%、34.27%、35.97%,Cd 的含量分别降低了 35.25%、36.59%、74.07%、59.44%,但仍高于富集实验开始前的含量,与富集开始第 3 天龙须菜中 Cu、Cd 的含量比较接近。

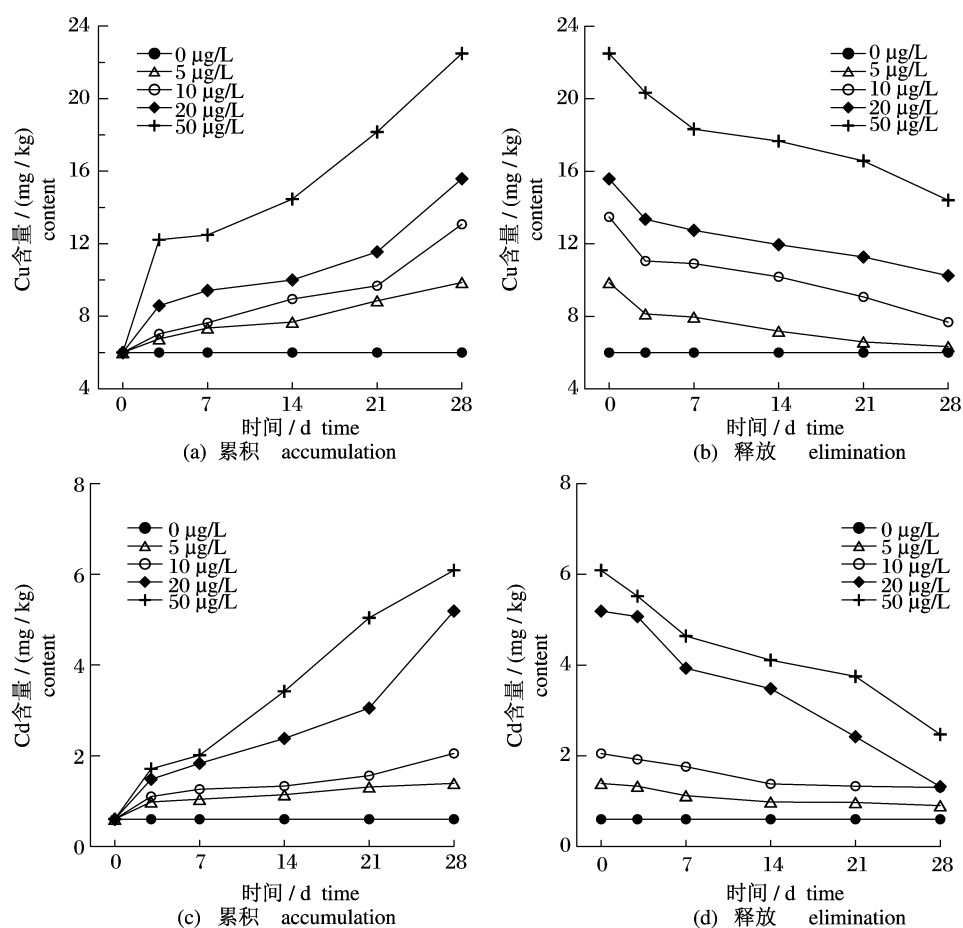


图 1 龙须菜对 Cu、Cd 的富集和释放特征

Fig. 1 The accumulation and elimination characteristics for copper and cadmium by *G. lemaneiformis*

在富集和释放阶段,龙须菜 Cu、Cd 含量变化速率列于表 1。随暴露浓度升高,龙须菜富集

Cu、Cd 的速率加快;在释放过程中,高浓度实验组,龙须菜中 Cu、Cd 的释放速率也加快。

表 1 富集与释放阶段龙须菜 Cu、Cd 含量的变化速率

Tab.1 The variation rate of copper and cadmium contents in *G. lemaneiformis* mg/(kg·d)

	Cu ²⁺ /(μg/L)				Cd ²⁺ /(μg/L)			
	5	10	20	50	1	5	10	20
累积 accumulation	0.12	0.22	0.26	0.42	0.017	0.035	0.137	0.186
释放 elimination	0.08	0.14	0.12	0.21	0.015	0.026	0.139	0.108

2.2 Cd²⁺、Cu²⁺ 共存对龙须菜富集 Cd、Cu 的影响

水体中共存 Cd²⁺ 浓度为 10 μg/L 时,Cd 对龙须菜富集 Cu 的影响如图 2 所示。可以看出,Cu²⁺ 浓度为 5、10 和 20 μg/L 的实验组(图 2-a、b、c),龙须菜中 Cu 的含量高于对照组龙须菜中 Cu 的含量。Cu²⁺ 浓度为 50 μg/L 的实验组(图 2-d),实验前期龙须菜中 Cu 含量高于对照组龙须菜中 Cu 的含量;实验的后期(第 21 和 28 天),实验组龙须菜中 Cu 的含量低于对照组龙须菜中

Cu 的含量。

不同浓度 Cu²⁺ 对龙须菜富集 Cd 的影响如图 3 所示。在不同 Cu²⁺ 浓度的水体中,实验前期龙须菜中 Cd 的含量高于对照组龙须菜中 Cd 的含量;在富集实验的最后(第 28 天),龙须菜中 Cd 的含量低于对照组。在实验的 Cu²⁺ 浓度范围内(5、10 和 20 μg/L),龙须菜中 Cd 的含量差异较小,表明水体中 Cu²⁺ 浓度变化对龙须菜富集 Cd 的影响较小。

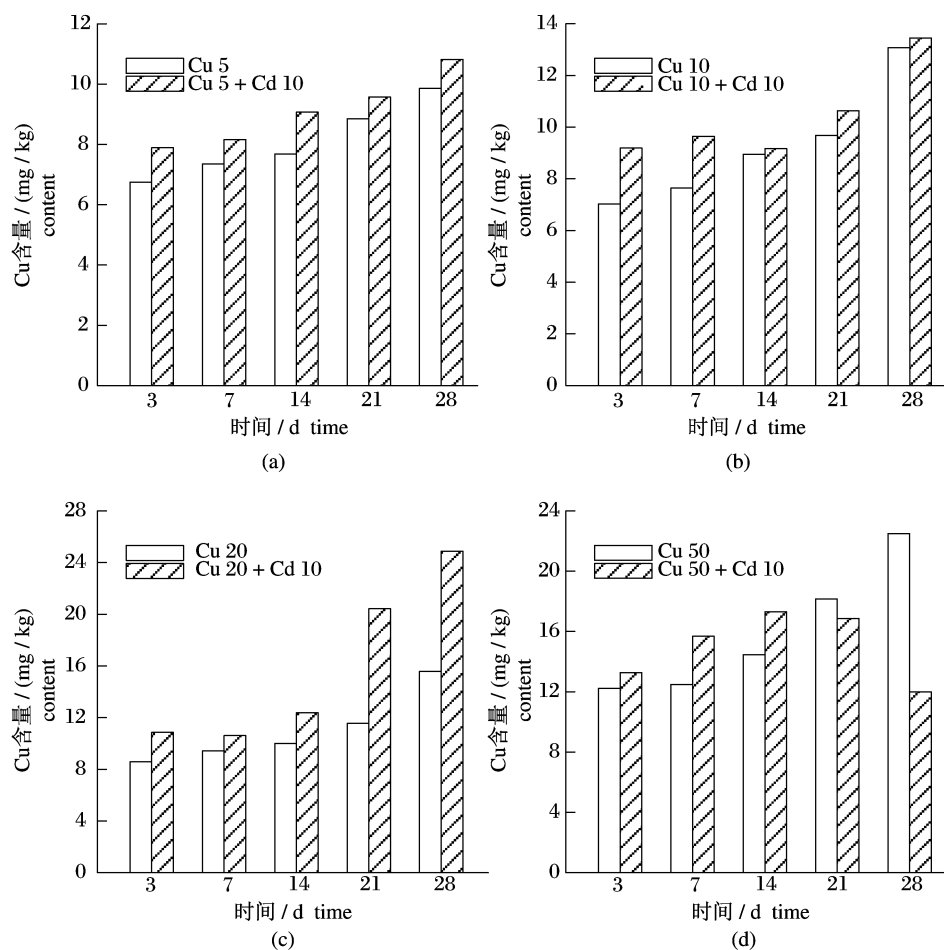


图 2 Cd 存在下龙须菜对 Cu 的富集

Fig.2 The accumulation for copper by *G. lemaneiformis* with cadmium coexist

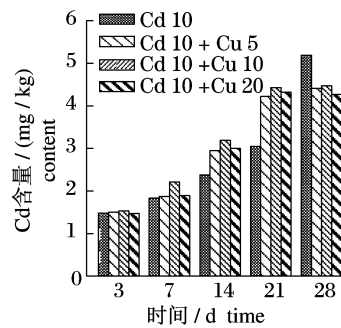


图3 不同浓度Cu对龙须菜富集Cd的影响

Fig. 3 The accumulation for cadmium by *G. lemaneiformis* influenced by various copper concentrations

2.3 龙须菜对Cu、Cd的富集速率常数

生物对重金属的富集模型主要有稳态模型、双箱模型和生物动力学模型等。本实验龙须菜对Cu、Cd的富集没有达到平衡,不适用于稳态模型。采用双箱模型,对实验结果进行拟合。根据双箱模型的原理^[10],龙须菜对Cu、Cd的富集和

释放过程描述如下:

$$C_t = C_0 + C_w \times k_u/k_e \times (1 - e^{-k_e \times t}) \quad (0 < t < t^*) \quad (1)$$

$$C_t = C_0 + C_w \times k_u/k_e \times (e^{-k_e \times (t-t^*)} - e^{-k_e \times t}) \quad (t < t^*) \quad (2)$$

式中, k_u 、 k_e 分别为富集和释放速率常数 $[\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})]$, C_t 分别为 t 时间龙须菜中Cu、Cd的含量 $(\mu\text{g}/\text{g})$, C_0 为实验开始前龙须菜中Cu、Cd的含量 $(\mu\text{g}/\text{g})$, C_w 为水体中Cu、Cd的含量 $(\mu\text{g}/\text{g})$, t^* 为富集实验结束的时间。

分别利用方程(1)和方程(2)对富集和释放阶段的实验数据进行拟合,得到龙须菜对Cu、Cd的富集和释放速率常数(表3)。可以看出,龙须菜对Cu的富集速率常数随 Cu^{2+} 浓度升高而下降,而Cu的释放速率常数基本保持一致。龙须菜对Cd的富集和释放速率常数波动比较大。龙须菜对Cu富集的速率高于对Cd的速率,Cu和Cd的释放速率接近。

表2 龙须菜对Cu、Cd的富集和释放速率常数的影响

Tab. 2 The accumulation and elimination rate constants for copper and cadmium by *G. lemaneiformis*

	$\text{Cu}^{2+}/[\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})]$				$\text{Cd}^{2+}/[\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})]$			
	5	10	20	50	1	5	10	20
k_u	79.7	55.3	31.2	18.7	60.3	18.4	32.4	15.4
k_e	0.015	0.016	0.013	0.014	0.017	0.019	0.040	0.028
k_u/k_e	5 313	3 456	2 400	1 335	3 547	968	810	550

3 讨论

藻类累积重金属包括细胞外和细胞内两个阶段^[3,11-12],重金属通过扩散、络合和离子交换等过程被吸附到藻细胞表面,被吸附到藻细胞表面的离子可被其它离子、螯合剂或酸等洗脱、解吸下来,该过程迅速、可逆^[11]。吸附到细胞表面的重金属离子通过主动运输,透过细胞膜进入细胞内,该过程与代谢有关、依靠能量,富集速度缓慢,需要数天到数十天的时间,是一个不可逆的过程^[3,12]。

在细胞外阶段,藻类对微量元素富集是由其独特的细胞结构决定的,其细胞壁是主要由多糖、蛋白质和脂类组成的网状结构,带一定的负电荷,能与金属离子络合^[3]。对吸附金属离子有贡献的基团是羧基、醚、羟基和胺基等^[11],这些官能团所含的氮、氧、磷、硫等原子可以提供孤对电子与

金属离子配位,通过络合作用吸附重金属离子^[13-15]。某些海藻对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 的吸附是金属离子和羧基的螯合^[16-17]。龙须菜含糖量高^[18-19],其细胞壁所含功能基团能够与 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 生成稳定络合物,不断络合水体中的 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} ,使Cd、Cu的含量不断升高。动力学研究结果认为,吸附是一级反应,与金属离子的浓度成正比^[4]。鼠尾藻对 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 的富集实验表明,藻体积累金属离子的量与外界环境的金属离子质量浓度正相关^[20],这与本实验的结果一致,水体中 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 浓度越高,龙须菜对Cd、Cu的吸附量越高,龙须菜中Cd、Cu的含量越高。

藻类吸附重金属包含离子交换过程,用天然马尾藻吸附重金属,可以观察到溶液的pH值增加,被束缚在海藻酸性官能团上的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等轻金属离子被释放,和水溶液中的重金属离子在吸附位点上离子交换^[13]; Ca^{2+} 与

Cd^{2+} 的交换吸附量占镉总吸附量的 33% ~ 34%^[21]; Cu^{2+} 离子交换吸附量所占比例高达 77%^[13]。本实验龙须菜在暂养过程中,吸附来源于海水中的碱金属/碱土金属离子,与溶液中的 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 进行离子交换。当龙须菜被转移到清洁海水进行释放实验,龙须菜中 Cd、Cu 含量逐渐降低(图 1-b、d)。至释放实验结束,龙须菜累积的 Cu、Cd 分别释放出 35% ~ 43% 和 35% ~ 74%,被吸附的 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 通过反向的过程逐渐被解吸下来,表明这部分 Cu、Cd 是通过离子交换等途径被龙须菜富集。

藻类对重金属的细胞内累积过程,需要能量及某些特定酶的参加^[3],是活体海藻与非活体海藻生物富集的重要区别。重金属经过主动运输进入细胞内,可形成许多金属有机物如金属蛋白等^[11]。本实验中,经过释放后龙须菜 Cd、Cu 含量高于富集实验前的含量,表明 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 穿过细胞膜进入细胞内。

如同重金属能诱导高等植物合成螯合重金属的蛋白,藻类通过诱导产生金属络合物,把有害的离子形式转变为无害的蛋白结合形式,从而能够耐受环境中的重金属污染^[22-23]。Zn、Cd 能诱导蓝藻内源金属硫蛋白(MT)的表达,Cd 处理过的蛋白核小球藻和斜生栅藻细胞可溶性成份中能分离到 Cd 结合蛋白,而无镉处理的细胞中没有,该蛋白的形成使 Cd 以无毒形式存在^[23];从重金属胁迫的水藻中分离到植物螯合肽(PC),重金属-PC复合物的形成与含有巯基(-SH)、羟基(-OH)等基团的多肽有关^[23]。在本实验中, Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 共存时龙须菜 Cd、Cu 的含量高于 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 单独存在时的含量,可能与 MT、PC 等物质的产生有关。 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 共存时能诱导龙须菜产生更多的 MT、PC,从而结合更多地 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 。水体中 Cu^{2+} 浓度超过 50 $\mu\text{g/L}$ 时对龙须菜生长有明显的抑制作用^[9],生长速率下降 33.7%,这可能是 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 共存时, Cu^{2+} 浓度为 50 $\mu\text{g/L}$ 实验组第 21 和 28 天龙须菜 Cu 含量降低的原因(图 2-d)。由于重金属的联合作用复杂,共存条件下海藻对重金属累积特征的研究罕有报道, Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 共存时龙须菜对 Cu、Cd 的累积特征及其机理,还需要进一步的研究。

藻类对重金属的富集能力不同,同种藻类对不同重金属的累积能力也不相同^[23]。海洋生物

对重金属的积累取决于金属进生物体的速率,相对的速率变化决定了生物对特定金属的积累。龙须菜对 Cu 的吸收速率常数高于对 Cd 的吸收速率常数,Cu、Cd 的释放速率常数相近(表 2),结果表现为龙须菜对 Cu 的富集能力高于对 Cd 的富集能力。在龙须菜对水体 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的去除效率实验中, Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度小于 50 $\mu\text{g/L}$ 时,Cu、Cd 的去除效率分别为 99.9%、93.1%; Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 浓度升高至 500 $\mu\text{g/L}$ 时,Cu、Cd 的去除效率分别为 55.2%、86.2%^[7],表明在较低浓度时,龙须菜对 Cu 的吸收能力高于对 Cd 的吸收能力;随 Cu^{2+} 浓度升高,龙须菜对 Cu 的富集能力降低。

本实验选择水体 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 最高浓度与 III、IV 类海水相当,经过 28 d 富集后龙须菜中 Cu、Cd 的含量分别升高 3 倍和 5 倍。在此浓度的水体中,Cu、Cd 不会对龙须菜的生长产生抑制,因此龙须菜可用于对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 污染水体的修复、净化。由于龙须菜对 Cu、Cd 的富集能力强,在无公害海水养殖环境中($\text{Cd} \leq 5 \mu\text{g/L}$,《无公害食品海水养殖用水水质 NY 5052-2001》),龙须菜 Cd 的含量超过藻类产品质量限量要求(无公害食品海藻 NY 5056-2005);经过 28 d 释放实验后,龙须菜中 Cd 的含量符合藻类产品质量限量要求。因此,龙须菜作为经济藻类养殖,必须严格控制养殖环境。同时,对养成产品进行适当的净化,确保龙须菜吸收的 Cu、Cd 等含量符合藻类产品的限量要求。

4 结论

本实验结果表明,龙须菜对水体中 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 有较强的富集能力,龙须菜 Cu、Cd 的含量与水体中 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的浓度以及暴露时间呈显著正相关,龙须菜对 Cu 的富集能力高于对 Cd 的富集能力。水体中存在一定浓度 Cd^{2+} 时,龙须菜 Cu 含量升高;同样,水体中存在 Cu^{2+} 时,龙须菜 Cd 的含量也升高,但不同 Cu^{2+} 浓度对龙须菜 Cd 含量影响小。

富集与释放实验结果表明,离子交换和络合是龙须菜对 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的富集的重要途径,被龙须菜吸附的 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 通过解吸能重新被释放。

参考文献:

[1] 邓莉萍. 藻体对水环境中 N、P 及重金属 Cu^{2+} 、

- Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 的吸附特征研究[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所,2008.
- [2] 吴海锁,张洪玲,张爱茜,等. 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.
- [3] 李志勇,郭祀远,李琳,等. 藻类富集微量元素的机理研究[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,1998,26(2):33-37.
- [4] 潘进芬,林荣根. 海洋微藻吸附重金属的机理研究[J]. 海洋科学,2000,24(2):31-34.
- [5] 杨宇峰,费修纁. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. 青岛海洋大学学报:自然科学版,2003,33(1):53-57.
- [6] FEI X G. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation [J]. *Hydrobiologia*,2004,512(1-3):145-151.
- [7] 吴小松,黄鹤忠,丁飞飞,等. 龙须菜对水体 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的去除效率及其生理响应[J]. 水生生态学杂志,2009,2(5):41-45.
- [8] YANG Y F, FEI X G, SONG J M, *et al.* Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal waters [J]. *Aquaculture*, 2006, 254(1-4):248-255.
- [9] 朱喜锋,邹定辉,简建波,等. 龙须菜对重金属铜胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报,2009,20(6):1438-1444.
- [10] KAHLE J, ZAUKE G P. Bioaccumulation of trace metals in the copepod *Calanoides acutus* from the Weddell Sea (Antarctica): comparison of two compartment and hyperbolic toxicokinetic models [J]. *Aquatic Toxicology*,2002,59(122):115-135.
- [11] 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.
- [12] 常秀莲,王文华,冯咏梅. 海藻吸附重金属离子的研究[J]. 海洋通报,2003,22(2):39-44.
- [13] 周洪英,王学松,李娜,等. 关于海藻吸附水溶液中重金属离子的研究进展[J]. 科技导报,2006,24(12):61-66.
- [14] FOUREST E, VOLESKY B. Contribution of sulphonate groups and alginate to heavy metal biosorption by the dry biomass of *Sargassum fluitans* [J]. *Environmental Science & Technology*,1996,30(1):277-282.
- [15] CRIST R H, OBERHOLSER K, MCGARRITY J, *et al.* Interaction of metals and protons with algae. 3. Marine algae, with emphasis on lead and aluminum [J]. *Environmental Science & Technology*,1992,26(3):496-502.
- [16] SHENG P X, TING Y P, CHEN J P, *et al.* Sorption of lead, copper, cadmium, zinc, and nickel by marine algal biomass: characterization of biosorptive capacity and investigation of mechanisms [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2004, 275(1):131-141.
- [17] RAIZE O, ARGAMAN Y, YANNAI S. Mechanisms of biosorption of different heavy metals by brown marine macroalgae [J]. *Biotechnology and Bioengineering*,2004,87(4):451-458.
- [18] 杨文鸽,谢果凰,徐大伦,等. 龙须菜多糖的降解及其降解产物的抗氧化活性[J]. 水产学报,2009,33(2):342-347.
- [19] WEN X, PENG C L, ZHOU H C, *et al.* Nutritional composition and assessment of *Gracilaria lemaneiformis* Bory [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*,2006,48(9):1047-1053.
- [20] 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.
- [21] 常秀莲,王文华,冯咏梅,等. 不同海藻吸附重金属镉离子的研究[J]. 离子交换与吸附,2002,18(5):432-439.
- [22] 邬飞波,张国平. 植物螯合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. 应用生态学报,2003,14(4):632-636.
- [23] 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.

Accumulation characteristics for copper and cadmium by *Gracilaria lemaneiformis*

WANG Zeng-huan^{*}, WANG Xu-nuo, LIN Qin, LI Liu-dong

(South China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Algae accumulate heavy metal elements from waters and are used to deal with polluted waters. *Gracilaria lemaneiformis* has been extensively cultivated as a source of commercial agar and the ecomaterials along the eastern coast of China and Nan'ao county, Guangdong Province. This seaweed has very high productivity and could absorb large quantities of N, P, CO₂, and have excellent effect on decreasing eutrophication. Copper and cadmium are extensively used in industry and agriculture and pollute the marine environment. In order to remove the copper and cadmium in polluted waters, the author investigated the accumulation and elimination for copper and cadmium using cultivated *G. lemaneiformis* as materials in the low copper and cadmium concentration waters. The accumulation experiment results showed that the copper and cadmium could be accumulated by *G. lemaneiformis*, the copper and cadmium contents in *G. lemaneiformis* were obviously positively related with the copper and cadmium concentrations in waters, and with the exposed time of *G. lemaneiformis*. The copper and cadmium contents in *G. lemaneiformis* exposed to waters mixed copper with cadmium were higher than that exposed to waters with copper or cadmium alone. The uptake rate constant and elimination rate constant were obtained from two-compartment model by nonlinear curve fitting. The curve fitting results showed that the accumulation capacity for copper by *G. lemaneiformis* was higher than that for cadmium. And the accumulation capacity for copper and cadmium by *G. lemaneiformis* decreased when the *G. lemaneiformis* was exposed to higher copper and cadmium concentration waters. The elimination experiment results showed that the copper and cadmium were accumulated in *G. lemaneiformis* mainly by way of ion exchange, and some of these copper and cadmium were eliminated by the same way. According to the experiment results, to remove copper and cadmium from polluted waters using *G. lemaneiformis* as materials is feasible.

Key words: *Gracilaria lemaneiformis*; copper; cadmium; bioaccumulation

Corresponding author: WANG Zeng-huan. E-mail: zh-wang@people.com.cn