

伊乐藻对 Cu Cd 污染底泥修复的应用研究

王 谦^{1,2}, 成水平¹, 李 柱^{1,2}, 吴振斌¹

(1.中国科学院水生生物研究所 淡水生态与生物技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2.中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要:在自然条件下,采用人工模拟水缸培养方法,研究了湖泊底泥不同 Cu、Cd 处理对沉水植物伊乐藻生长、叶绿素含量以及 Cu、Cd 吸收和积累的影响。结果表明,较低浓度 Cu 刺激伊乐藻的生长(生物量、叶绿素),高浓度抑制伊乐藻的生长;随着 Cd 处理浓度的增加,伊乐藻的生物量、叶绿素含量均一直降低,在底泥 Cd 含量为 $168.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ (含背景值)时,植株出现死亡。随着 Cu 处理浓度的增加,伊乐藻体内的 Cu 含量一直增加,在底泥 Cu 含量为 $414 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ (含背景值)时,根部、叶部的富集系数均达到最大(0.21 和 0.17);伊乐藻体内的 Cd 含量随 Cd 处理浓度的增加先增后减,底泥 Cd 含量为 $88.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 时,根部、叶部的富集系数均达到最大(0.07 和 0.09)。以上结果说明,伊乐藻对 Cu、Cd 具有很强的耐受性,可以作为原位修复 Cu 和 Cd 污染底泥的植物种类应用。

关键词:原位植物修复; Cu; Cd; 富集; 底泥; 沉水植物

中图分类号: X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)08-1676-07

In situ Remediation of Cu and Cd Polluted Sediment by *Elodea nuttallii*

WANG Qian^{1,2}, CHENG Shui-ping¹, LI Zhu^{1,2}, WU Zhen-bin¹

(1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Macrophytes show great potential to remedy heavy metals contaminated water bodies. Nevertheless, there is still lack of knowledge concerning phytoextraction of heavy metals from sediment by submerged macrophyte *in situ*. In the present study, remediation of copper (Cu) and cadmium (Cd) polluted sediment by *Elodea nuttallii* were studied in pot experiment. The growth and physiological activities of *E. nuttallii*, and the metal accumulation in plant were investigated under different Cu, Cd treatment levels. The growth of *E. nuttallii* was stimulated under low concentration Cu treatment, but was inhibited under higher concentration Cu treatment with Cu concentration of $1\ 014 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$. The biomass and chlorophyll content of *E. nuttallii* decreased significantly with the increasing of Cd concentration in treatments, moreover a few of *E. nuttallii* seedlings died when the Cd concentration in sediment reached $168.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$. The concentrations of Cu in both roots and leaves of *E. nuttallii* increased significantly with the increasing of Cu concentration in treatments, the bioconcentration factors (BCF) in root and leaf were reached the highest values with 0.21 and 0.17, respectively, under the treatment of Cu concentration was $414 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ in sediment. The concentrations of Cd in both roots and leaves of *E. nuttallii* increased slowly at lower Cd level but decreased dramatically when Cd concentration was higher than $88.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ in the treatment, and the BCFs of root and leaf reached the highest values with 0.07 and 0.09 under the treatment of Cd was $88.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$, respectively. Conclusionly, *E. nuttallii* could be suitable pioneer species for phytoremediation of sediment contaminated by Cu and Cd due to its strong reproduce and tolerance ability.

Keywords: *in situ* phytoremediation; Cu; Cd; accumulation; sediment; submerged macrophyte

随着经济的发展,含有大量重金属离子的各种工业废水以及生活污水等常在未经适当处理时就排

放到河流和湖泊中,进入水体的重金属绝大部分迅速地转移至底泥和悬浮物中^[1]。Cu、Cd 等重金属进入沉积物后,由于移动性小而很难清除。常用的工程措施或化学方法治理底泥重金属污染,不仅成本昂贵,而且会破坏底泥结构以及微生物区系,甚至可能造成“二次污染”。植物修复技术作为一种新兴的绿色生物技术,能在不破坏底泥生态环境,保持底泥结构和微生物活性的状况下,通过植物的根系直接将污染元素

收稿日期:2008-12-27

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-426);国家重大科技专项(2008ZX07316-004)

作者简介:王 谦(1984—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为植物修复。

通讯作者:成水平 E-mail:shpcheng@ihb.ac.cn

吸收,从底泥中带走,从而修复被污染的底泥^[2],利用水生植物(特别是沉水植物)对底泥重金属污染进行原位修复也是一种治理方式,一些研究已开始了利用水生植物修复水体重金属污染^[3-6],而利用沉水植物进行底泥重金属污染原位修复的并不多见。

伊乐藻(*Elodea nuttallii*)原产北美,属于一年生高等沉水草本植物,于 20 世纪 80 年代从日本引入我国,具有耐污性和适应性强、繁殖快、能越冬生长、可作为鱼虾的饵料等优点,所以被越来越广泛地引种,并应用于污染水体的生态修复,并对底泥污染物有较高的耐性^[7-9]。本研究以伊乐藻为供试植物,研究底泥不同浓度的 Cu、Cd 处理条件对伊乐藻生理指标及其植株富集 Cu、Cd 的影响,以期探讨伊乐藻对底泥重金属的耐受程度与修复潜力。

1 材料与方法

1.1 供试土样

采集武汉月湖底泥,运回后搅匀风干,取一部分底泥粉碎后过 20 目筛用于基本理化性质分析^[10],余下的样品作为进一步试验的材料。该样品的理化性质见表 1。

1.2 供试植物

在中国科学院水生生物研究所的中试基地选取生长一致没有任何污染的伊乐藻幼苗,置于容量为 100 L 的水缸中培养。

1.3 试验设计

取容量为 100 L,80 cm 高的水缸,每缸装干重底泥 5 kg,以 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)用于污染处理,添加浓度分别为 0(对照)、100、200、400、800 $\text{mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$;0(对照)、20、40、80、160 $\text{mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$ (按纯 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 计)。先将底泥分别与 Cu、Cd(CuCl_2 、 CdCl_2 水溶液)混匀并在其表面加 1 cm 厚干底泥防止重金属向水体释放,再加水 60 L 平衡 7 d,然后插秧,每缸鲜重共计为 60 g 的长短一致的伊乐藻幼苗 30 株,每个处理重复 3 次,培养 21 d 后收割。

1.4 试验条件

试验在自然条件下进行。光照约 14 h;白天/夜间温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ /20 $^{\circ}\text{C}$;相对湿度 60%~70%。

1.5 样品测定

伊乐藻叶绿素含量在收割前测定,采用浸提法测定叶绿素含量^[11]。

伊乐藻鲜重称量之前需将其冲洗干净,并用粗滤纸将水分吸干。

伊乐藻根叶中 Cu、Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解^[12];植株提取液中的 Cu、Cd 含量用美国产电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定。

1.6 数据处理

测定结果用 SPSS13.0 统计软件进行 One-way ANOVA 方差分析,用 LSD 法进行均数的多重比较以

表 1 供试底泥样品的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical characteristics of sediment samples

pH(1:1)	Eh/mV	CEC*/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$	OM*/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{CaCO}_3/\%$	$\text{Cd}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{Cu}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
7.50(0.00)**	-88.0(2.00)	180(2.37)	12.9(0.14)	2.66(0.08)	8.69(0.00)	214(1.85)

注: *CEC 指阳离子交换量,OM 指有机质。CEC is cation exchange capacity, OM is organic matters;

** 表中数据表示为:平均值(标准差)。Mean value with standard deviation in brackets.

表 2 不同 Cu 处理底泥中伊乐藻生物量增长率

Table 2 The growth of *Elodea nuttallii* in the sediment with different concentration of Cu treatment

底泥 Cu 含量 Concentration of Cu in sediment/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$	214	314	414	614	1 014
伊乐藻生物量增长率 Increase biomass of <i>Elodea nuttallii</i> /%	71.0(1.33)*	103(4.68)	116(4.28)	162(8.00)	23.3(4.23)

注: * 表中数据表示为:平均值(标准差)。Mean value with standard deviation in brackets.

表 3 不同 Cd 处理底泥中伊乐藻生物量增长率

Table 3 The growth of *Elodea nuttallii* in the sediment with different concentration of Cd treatment

底泥 Cd 含量 Concentration of Cd in sediment/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DW}$	8.69	28.69	48.69	88.69	168.69
伊乐藻生物量增长率 Increase biomass of <i>Elodea nuttallii</i> /%	71.0(1.33)*	54.4(7.42)	49.2(8.66)	28.9(3.25)	-5.34(1.30)

注: * 表中数据表示为:平均值(标准差)。Mean value with standard deviation in brackets.

及进行相关分析,显著性水平设为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 供试植物生物量的变化

表 2、表 3 给出了不同 Cu、Cd 浓度处理条件下 21 d 的伊乐藻生物量增长率。伊乐藻生物量增长率随 Cu 处理浓度的增加先增后减;而随 Cd 处理浓度的增加,伊乐藻的生物量增长率一直降低,在培养 15 d 后,处理浓度为 $168.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 的植物出现褪绿、坏死现象。

耐性系数(tolerance index, TI)是用来评价重金属对植物生长产生的抑制或促进作用的重要参数,是指存在重金属条件下的植物生物量与对照条件下的植物生物量的比值^[13-14]。TI>1,表明产生促进作用;反之亦然。

如图 1 所示,随着 Cu 处理浓度的增加,伊乐藻耐性系数呈抛物线型。当底泥 Cu 浓度 $\leq 614 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$

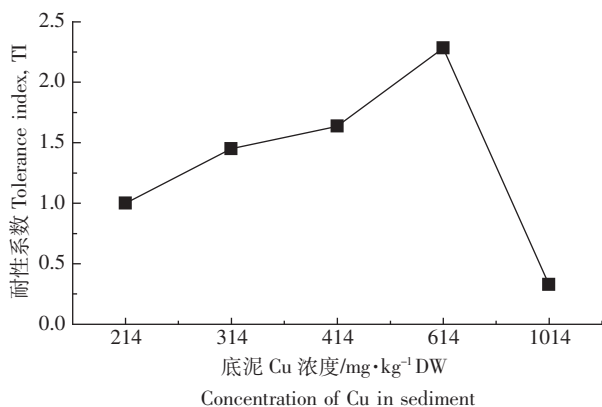


图 1 不同 Cu 浓度底泥中伊乐藻的耐性系数

Figure 1 The tolerance index of *Elodea nuttallii* in the sediment with different concentration of Cu

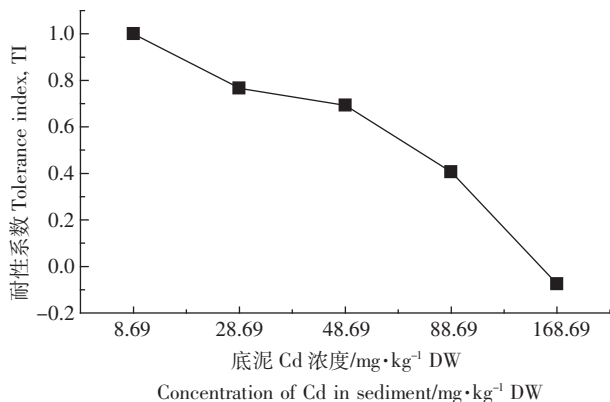


图 2 不同 Cd 浓度底泥中伊乐藻的耐性系数

Figure 2 The tolerance index of *Elodea nuttallii* in the sediment with different concentration of Cd

时,伊乐藻耐性系数表现出增加趋势且大于 1,植株生物量均显著高于对照组植株生物量($P<0.05$)。当底泥 Cu 浓度达到 $1014 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 时,植株生物量增长率降低,生物量显著低于对照的植株生物量($P<0.05$)。

如图 2 所示,随着底泥 Cd 浓度的增加,伊乐藻耐性系数呈下降趋势并且都小于 1,处理组植株生物量显著低于对照组植株生物量($P<0.01$)。相关分析结果表明,Cd 胁迫对伊乐藻耐性系数产生的效应与胁迫程度呈显著负相关($R^2=0.93, n=12, P<0.01$)。

2.2 叶片中叶绿素含量的变化

从图 3 可以看出,不同 Cu 处理浓度对伊乐藻叶片中叶绿素 a、b 含量有影响,但叶绿素 a 含量与叶绿素 b 变化趋势没有显著差异,其比值约为 2.55。

多重比较结果表明,与其他处理组相比,Cu 浓度为 $1014 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 时可明显降低叶片叶绿素 a、b 含量($P<0.05$)。

从图 4 可以看出,随着底泥 Cd 浓度的增加,伊

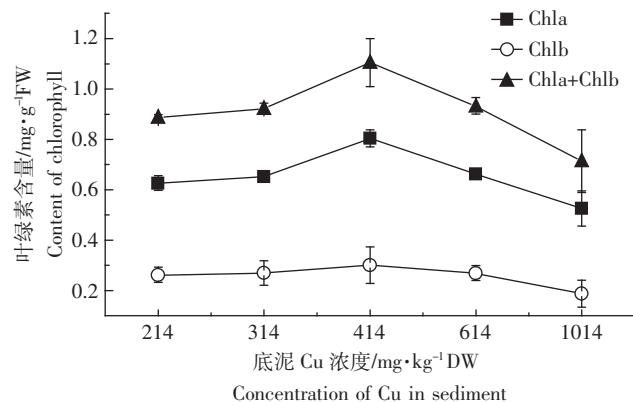


图 3 不同 Cu 浓度底泥中伊乐藻叶绿素含量

Figure 3 The chlorophyll content of *Elodea nuttallii* in the sediment with different concentration of Cu

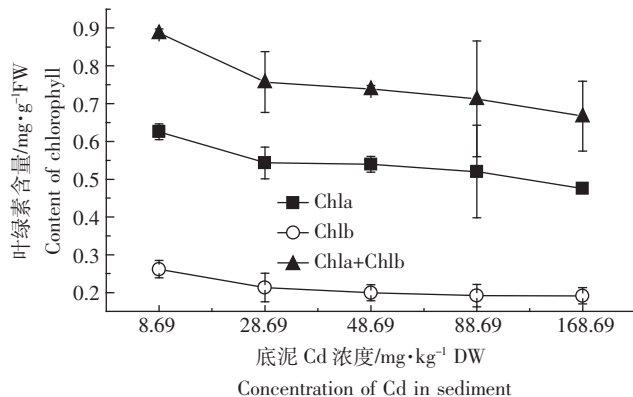


图 4 不同 Cd 浓度底泥中伊乐藻叶绿素含量

Figure 4 The chlorophyll content of *Elodea nuttallii* in the sediment with different concentration of Cd

乐藻叶绿素含量呈下降趋势。多重比较结果表明,与对照相比,各个 Cd 处理水平可明显降低叶片叶绿素 a、b 含量($P<0.05$)。

相关分析结果表明,Cd 胁迫对伊乐藻叶绿素含量产生的降低效应与胁迫程度呈显著正相关($R^2=0.66$, $n=15$, $P<0.05$)。

Cu 污染对伊乐藻生物量相对增长率和叶绿素含量的影响趋势大致相同,都是先微升后递减。这与储玲等^[15]对三叶草,谷巍等^[16]对菹草的研究相一致。可能是少量 Cu 弥补了植物体内质体蓝素所需,而质体蓝素又是光合作用电子传递系统的一部分,因此,适宜浓度的 Cu 可使叶绿素含量增加。而高浓度 Cu 则使叶绿体酶活性失调,叶绿体分解加快;同时,局部积累 Cu 过多,与叶绿体蛋白质上的-SH 结合或取代其中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} ,致使叶绿体蛋白中心粒子组成发生变化而失活;并且,过量 Cu 抑制光合链中的电子传递,尤其是光合系统 II (PS II)。其原因可能是 Cu 参与植物摄取 Fe 过程的竞争,使 Fe 缺乏而引起叶绿素合成受阻,从而提高 PS II 对光的敏感性,阻碍光合作用中 CO_2 的固定。

Cd 能抑制植物的生长及生物量的增加,使植物叶绿素含量降低。这与 Cheng 等^[17]、Barcelo 等^[18]的研究一致。目前,已有许多研究报道了 Cd 对细胞结构产生明显伤害,主要集中在叶绿体、细胞核、线粒体等细胞器以及对染色体的影响,例如叶绿体膜受到破坏、结构异常^[19]。大量研究成果表明,重金属 Cd 对细胞核、线粒体、叶绿体等细胞器均能造成不可逆的损害,对光合系统 II (PS II) 产生伤害^[20],破坏了细胞正常生理活动所需的结构基础,从而导致细胞的死亡^[21]。

2.3 伊乐藻对 Cu 的富集特征

表 4 给出了不同 Cu 浓度处理 21 d 后伊乐藻根部及叶部的 Cu 含量。对照培养伊乐藻根部、叶部中 Cu 的含量分别为:25.4、23.3 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW,随着底泥中 Cu 浓度的增加,伊乐藻体内含 Cu 量也随之增加。当底泥含 Cu 量达到 1 014 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW 时,根、叶中 Cu 的含

量分别为 139、112 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW。相关分析结果表明,伊乐藻根部、叶部 Cu 含量与 Cu 浓度均呈显著正相关($R^2=0.96$, $n=15$, $P<0.01$; $R^2=0.95$, $n=15$, $P<0.01$)。

富集系数和转移系数是富集植物的两个基本特征。富集系数(bioconcentration factor, BCF)是指植物中某元素含量与底泥中该元素含量之比^[22]。富集系数表征底泥-植物体系中元素迁移的难易程度,是反映植物将重金属吸收转移到体内能力大小的评价指标,富集系数越高,表明植物地上部重金属富集质量分数越大。转移系数(translocation factor, TF)指地上部元素的含量与地下部同种元素含量的比值^[23],用来评价植物将重金属从地下向地上的运输和富集能力,转移系数越大,则重金属从根系向地上部器官转运能力越强。

图 5 显示,伊乐藻根部和叶部 Cu 的生物富集系数分别为 0.13~0.21 和 0.11~0.17。当底泥中 Cu 浓度为 414 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW 时,伊乐藻根部、叶部 Cu 的生物富集系数均达到最大值。相关分析结果表明,伊乐藻根部 Cu 的富集系数与叶部的富集系数呈显著正相关($R^2=0.80$, $n=15$, $P<0.01$)。非富集型植物的富集系数一般低于 0.04^[24],而伊乐藻的富集系数远大于 0.04。

从伊乐藻中不同部位的含 Cu 量来看,伊乐藻根

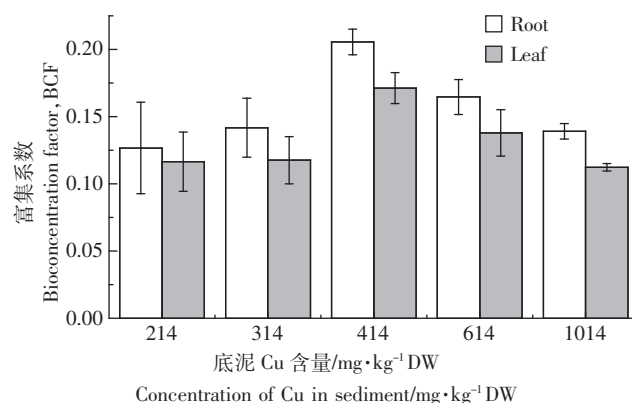


图 5 不同 Cu 浓度底泥伊乐藻体内 Cu 的富集系数

Figure 5 The bioconcentration factor of Cu in *Elodea nuttallii* under different concentration of Cu treatment in sediment

表 4 不同 Cu 处理底泥中伊乐藻体内的 Cu 含量

Table 4 The concentrations of Cu in *Elodea nuttallii* under different Cu treatment in sediment

底泥 Cu 浓度 Concentration of Cu in sediment/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW	214	314	414	614	1 014
根部 Cu 含量 Concentration of Cu in root/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	25.4(6.80)*	42.5(6.58)	82.3(3.83)	98.8(7.74)	139(5.81)
叶部 Cu 含量 Concentration of Cu in leaf/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	23.3(4.40)	35.3(5.27)	68.5(4.63)	82.8(10.3)	112(2.81)

注: * 表中数据表示为:平均值(标准差)。Mean value with standard deviation in brackets.

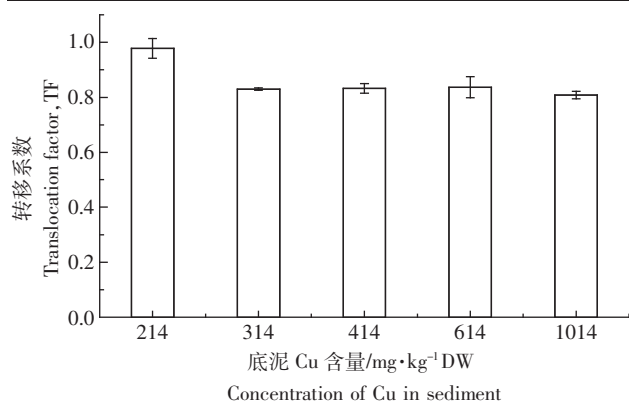


图 6 不同 Cu 浓度底泥伊乐藻体内 Cu 的转运系数

Figure 6 The translocation factor of Cu in *Elodea nuttallii* under different concentration of Cu treatment in sediment

部 Cu 含量大于叶部 Cu 含量。图 6 显示 TF 在 0.81~0.98 之间,比超富集植物的 TF(TF>1)略低,但比非富集型植物高出许多^[24]。

2.4 伊乐藻对 Cd 的富集特征

表 5 给出了不同 Cd 处理 21 d 后的伊乐藻根部及叶部 Cd 含量。随着底泥中 Cd 浓度的增加,伊乐藻根部、叶部 Cd 含量均先升高再降低。当底泥含 Cd 量达到 88.69 mg·kg⁻¹ DW 时,根部、叶部中 Cd 含量分别达到最大值,分别为 6.50、7.85 mg·kg⁻¹ DW。多重比较分析表明,与对照相比,在不同 Cd 处理浓度下的伊乐藻根部、叶部 Cd 含量均有显著性差异($P<0.01$)。

图 7 显示,伊乐藻根部 Cd 的生物富集系数为 0.00~0.08,叶部 Cd 的生物富集系数为 0.00~0.09。当底泥中 Cd 浓度为 88.69 mg·kg⁻¹ DW 时,伊乐藻根部、叶部 Cu 的富集系数均达到最大值,明显高于其他处理组($P<0.05$);相关分析结果表明,伊乐藻根部 Cd 富集系数与叶部的富集系数呈显著正相关($R^2=0.97, n=15, P<0.01$)。而在 Cd 浓度为 168.69 mg·kg⁻¹ DW 条件下,因生长受阻富集系数下降。图 2、图 7 表明,伊乐藻在高浓度 Cd 污染条件下(≤ 88.69 mg·kg⁻¹ DW),可以存活并表现出了一定的富集能力。

图 8 显示 Cd 在伊乐藻体内的 TF 在 0.82~1.21 之间,当底泥中 Cd 浓度为 88.69 mg·kg⁻¹ DW 时,TF

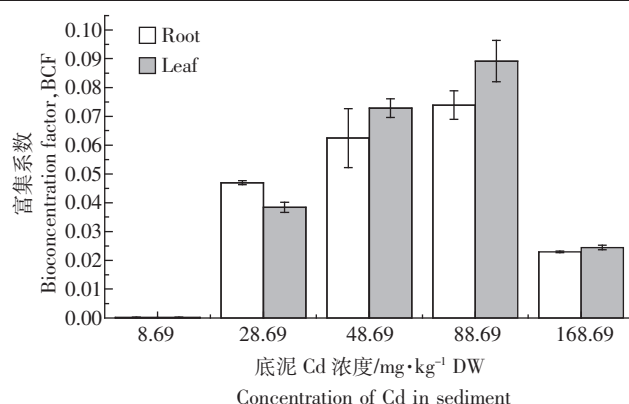


图 7 不同 Cd 浓度底泥伊乐藻体内 Cd 的富集系数

Figure 7 The bioconcentration factor of Cd in *Elodea nuttallii* under different concentration of Cd treatment in sediment

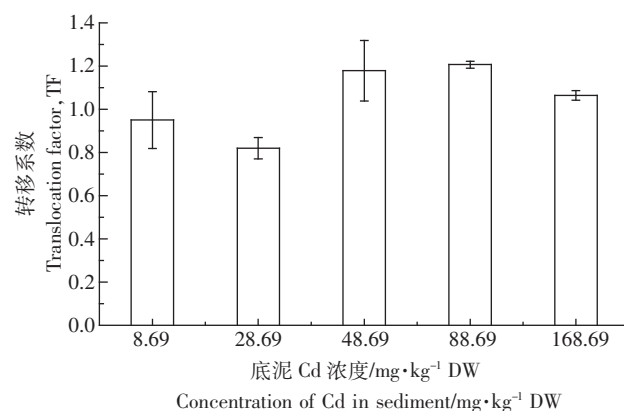


图 8 不同 Cd 浓度底泥伊乐藻体内 Cd 的转运系数

Figure 8 The translocation factor of Cd in *Elodea nuttallii* under different concentration of Cd treatment in sediment

达到最大值。

本研究中,当底泥中 Cu 浓度 ≤ 614 mg·kg⁻¹ DW 时,伊乐藻生物量增长率为 71.0%~162%;当底泥中 Cd 浓度 ≤ 88.69 mg·kg⁻¹ DW 时,伊乐藻生物量增长率为 28.9%~71.0%。这就说明在 Cu、Cd 污染胁迫下,伊乐藻表现出了很强的适应、耐受和繁殖能力,可以在污染湖泊底泥中作为先锋种定植繁衍,对于湖泊水生植物恢复/重建、恢复湖泊生态系统具有重要意义。

简敏菲等^[25]报道底泥 Cu 含量为 251.95 mg·kg⁻¹

表 5 不同 Cd 处理底泥中伊乐藻体内的 Cd 含量

Table 5 The concentrations of Cd in *Elodea nuttallii* under different Cd treatment in sediment

底泥 Cd 浓度 Concentration of Cd in sediment/mg·kg ⁻¹ DW	8.69	28.69	48.69	88.69	168.69
根部 Cd 含量 Concentration of Cd in root/mg·kg ⁻¹	n.d.*	1.31(0.02)**	3.00(0.49)	6.50(0.44)	3.81(0.09)
叶部 Cd 含量 Concentration of Cd in leaf/mg·kg ⁻¹	n.d.	1.08(0.05)	3.50(0.15)	7.85(0.63)	3.91(0.35)

注:* 对照未检出。no detected in control.** 表中数据表示为:平均值(标准差)。Mean value with standard deviation in brackets.

DW 的生境下,一些挺水植物如水芹、荻等的生物富集系数为 0.04~0.13,而本研究伊乐藻在此条件下根部、叶部富集系数分别达到 0.14 和 0.12,甚至在 414 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW 条件下根部、叶部富集系数可分别达到 0.21 和 0.17,由此可见伊乐藻富集 Cu 能力较上述挺水植物高。黄亮等^[20]调查长江中游若干湖泊中水生植物菹齿眼子菜、微齿眼子菜叶部对 Cd 的生物富集系数为 0.07~0.09,伊乐藻叶部富集系数与其相当,而菰、芦苇叶部未检测到 Cd,可见沉水植物更有利于 Cd 的富集。

伊乐藻在 Cu、Cd 污染胁迫下可以生长繁殖,并且与其他一些水生植物特别是挺水植物相比具有较高的富集能力,可以作为先锋物种在湖泊污染治理初期阶段应用,改善底泥生境和减轻污染,促进湖泊生态恢复。

3 结论

(1)伊乐藻在受试浓度 Cu、Cd 分别为 1 014、88.69 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ DW 以下时,表现出了一定的适应能力和耐性。

(2)伊乐藻根部、叶部对 Cu 的富集系数分别为 0.13~0.21、0.11~0.17;对 Cd 的富集系数分别为 0.00~0.07、0.00~0.09。Cu、Cd 在伊乐藻体内的转运系数均较高,都达到了 0.8 以上。与其他水生植物相比,伊乐藻的富集能力较高,可以作为 Cu、Cd 污染底泥修复的先锋物种。

参考文献:

- [1] Yun S L, Kim S J, Park Y J, et al. Evaluation of capping materials for the stabilization of contaminated sediments[J]. *Mater Sci Forum*, 2007, 545: 565–568.
- [2] Moffat A S. Plants proving their worth in toxic metal cleanup[J]. *Science*, 1995, 269: 302–303.
- [3] Mishra V K, Tripathi B D. Concurrent removal and accumulation of heavy metals by the three aquatic macrophytes[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(15): 7091–7097.
- [4] Nedjimi B, Daoud Y. Cadmium accumulation in *Atriplex halimus* subsp. *schweinfurthii* and its influence on growth, proline, root hydraulic conductivity and nutrient uptake[J]. *Flora*, 2008, online first doi: 10. 1016/j. flora. 2008. 03. 004.
- [5] Nyquist J, Greger M. Uptake of Zn, Cu, and Cd in metal loaded *Elodea canadensis* [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(2): 219–226.
- [6] Kathleen Skinner, Nicole Wright, Emily Porter–Goff. Mercury uptake and accumulation by four species of aquatic plants[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(1): 234–237.
- [7] 马剑敏, 靳同霞, 李 今, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 及其联合胁迫对伊乐藻的生长及 POD 和 SOD 活性的影响[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 125–128.
- [8] MA Jian–min, JIN Tong–xia, LI Jin, et al. Effects of Hg^{2+} , Cd^{2+} and their combined stress on the growth and activities of POD and SOD of *Elodea nuttallii* [J]. *Journal of Henan Normal University (Nature Science)*, 2006, 34(4): 125–128.
- [9] 吴振斌, 马剑敏, 赵 强, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 及其复合胁迫对伊乐藻的毒害[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3): 262–266.
- [10] WU Zhen–bin, MA Jian–min, ZHAO Qiang, et al. Toxic harm of Hg^{2+} , Cd^{2+} and their combined stress on *Elodea nuttallii* [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(3): 262–266.
- [11] Zheng Zhang, Zhenbin Wu, Li He. The accumulation of alkylphenols in submersed plants in spring in urban lake, China[J]. *Chemosphere*, 2008, 73(5): 859–863.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [13] BAO Shi–dan. Soil and agricultural chemistry analysis (the 3rd edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- [14] American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater (the 17th edition) [M]. APHA. 1987.
- [15] Deng H, Ye Z H, Wong M H. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal–contaminated sites in China[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(1): 29–40.
- [16] Wilkins D A. A technique for the measurement of lead tolerance in plants[J]. *Nature*, 1957, 180, 37–38.
- [17] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. *New Phytologist*, 1978, 80: 623–633.
- [18] 储 玲, 刘登义, 王友保, 等. 铜污染对三野草幼苗生长及活性氧化代谢影响的研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 119–122.
- [19] CHU Ling, LIU Deng–yi, WANG You–bao, et al. Effect of copper pollution on seedling growth and activate oxygen metabolism of *Trifolium pratense* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 119–122.
- [20] 谷 巍, 施国新, 张超英, 等. Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 对菹草光合作用及保护酶系统的毒害作用[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2002, 28(1): 69–74.
- [21] GU Wei, SHI Guo–xin, ZHANG Chao–ying, et al. Toxic effects of Hg^{2+} , Cd^{2+} and Cu^{2+} on photosynthetic systems and protective enzyme systems of *Potamogeton crispus* [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 28(1): 69–74.
- [22] Cheng S P, Ren F, Grosse W, et al. Effects of cadmium on chlorophyll content, photochemical efficiency and photosynthetic intensity of *Can-na indica* Linn [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2002, 4(3): 239–246.
- [23] Barcelo J, Poschenrider C, Andreu I, et al. Cadmium–induced decrease of water stress resistance in bush bean plants I . effects of Cd on water potential, relative water content, and cell wall elasticity[J]. *J Plant Physiol*, 1986, 125: 17–25.
- [24] Ghoshroy S, Nadakavukaren M J. Influence of cadmium on the ultra–structure of developing chloroplasts in soybean and corn[J]. *Environ Exp Bot*, 1990, 30: 187–192.
- [25] 孙光闻, 朱祝军, 方学智, 等. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 700–703.

- SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi, et al. Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5):700-703.
- [21] 施国新, 杜开和, 解凯彬, 等. 汞、镉污染对黑藻叶细胞伤害的超微结构研究[J]. *植物学报*, 2000, 42(4):373-378.
- SHI Guo-xin, DU Kai-he, XIE Kai-bin, et al. Ultrastructural study of leaf cells damaged from Hg^{2+} and Cd^{2+} pollution in *Hydrilla Verticillata* [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2000, 42(4):373-378.
- [22] Dowdy D L, McKone T E. Predicting plant uptake of organic chemicals from soil or air using octanol/water and octanol/air partitioning ratios and a molecular connectivity index[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, 16:2448-2456.
- [23] Fayiga A, Ma L. Arsenic up take by two hyperaccumulator ferns from four arsenic contaminated soils[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2005, 168(1):71-89.
- [24] 沈振国, 刘友良. 重金属超量积累植物研究进展[J]. *植物生理学通讯*, 1998, 34(2):133-139.
- SHEN Zhen-guo, LIU You-liang. Progress in the study on the plants that hyperaccumulate heavy metal[J]. *Plant Physiology Communications*, 1998, 34(2):133-139.
- [25] 简敏菲, 宋玉斌, 倪才英, 等. 鄱阳湖湿地水生生物重金属污染的特性分析[J]. *江西师范大学学报:自然科学版*, 2006, 30(5):504-508.
- JIAN Min-fei, SONG Yu-bin, NI Cai-ying, et al. Analysis and assessment of heavy metal content of aquatic in the wetland of Poyang Lake [J]. *Journal of Jiangxi Normal University (Nature Science)*, 2006, 30(5):504-508.
- [26] 黄 亮, 李 伟, 吴 莹, 等. 长江中游若干湖泊中水生植物体内重金属分布[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(6):1-4.
- HUANG Liang, LI Wei, WU Ying, et al. Distribution of heavy metals in middle reach aquatic plants of some lakes in the Yangtze River[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(6):1-4.