

紫根水葫芦对重金属水体的净化作用

陈文萍¹ 徐舒阳¹ 那中元² 杨红军² 黄柏炎¹ 王莹^{1*}

(1. 暨南大学生命科学技术学院, 广州 510632; 2. 云南省生态农业研究所, 云南 650106)

摘要 为了探讨紫根水葫芦对污水中重金属(镉、锌、铅)的净化效果, 比较了普通水葫芦和紫根水葫芦的生物过滤能力和积累情况。实验结果显示, 2种水葫芦均能显著降低3种重金属的含量, 被吸收的重金属会在植物体内得到积累, 且主要富集于根部, 而不是茎叶部。此外, 被吸收的重金属绝大多数不会重新释放到水体中。紫根水葫芦对重金属的净化效果优于普通水葫芦。因此, 紫根水葫芦具有良好的水体修复和去除重金属的潜力。

关键词 普通水葫芦 紫根水葫芦 重金属 水体净化 生物累积

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)05-2284-07 DOI 10.12030/j.cjee.201506027

Effect of purple root water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on purification of water containing heavy metals

Chen Wenping¹ Xu Shuyang¹ Na Zhongyuan² Yang Hongjun² Huang Boyan¹ Wang Ying¹

(1. College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

2. Yunnan Research Institute of Ecological Agriculture, Yunnan 650106, China)

Abstract To investigate the purification capability of purple root water hyacinth by eliminating heavy metals (cadmium, zinc and lead), biofiltration and bioaccumulation of purple root water hyacinth were compared with normal water hyacinth. The results showed that both water hyacinths significantly reduced the three heavy metals concentrations, accumulating these absorbed heavy metals inside the plant. The heavy metals were enriched mostly in roots rather than stems and leaves. Most of the absorbed heavy metals could not be released to the growth solution again. Purple root water hyacinth had higher capability on heavy metal purification than normal water hyacinth. Therefore, purple root water hyacinth has good potential for water remediation and heavy metal removal.

Key words common water hyacinth; purple root water hyacinth; heavy metals; water purification; bioaccumulation

随着工业化的迅猛发展, 水体重金属污染问题也日益严峻, 现已成为了当今世界所面临的重要环境问题之一^[1-2]。由于重金属在水中和生物体内不易被降解^[3], 导致重金属在生物体内的积累, 破坏机体正常的生理代谢活动, 严重危害生物体的健康与生存, 通过生物链的传递, 间接地对人类的健康构成威胁^[4]。目前, 在众多去除污水中重金属处理方法里(如化学沉积法^[5]、离子交换^[6]、活性炭吸附^[7]等), 生物修复技术以低成本、高效率、环境友好型、操作方便等特点, 成为治理水污染的新出路, 越来越受到众人的关注^[8-10]。近年来研究结果显示, 水葫芦(学名, 凤眼莲, *Eichhornia crassipes*)是吸收、吸附水体中重金属的理想生物材料, 是净化水质效果最好的水生植物之一^[11-14]。然而, 水葫芦的木质素、纤维素含量较高, 蓄水量大而致使资源利用程度较

低, 腐烂降解后又会对水体造成二次污染^[15]。加之水葫芦的生长速度较快, 耗氧量又大, 导致水体中的动植物因缺氧而死亡。

为了解决上述的困扰问题, 云南省生态农业研究所根据外来物种水葫芦的生长特性, 运用作物基因表型诱导调控表达技术(GPIT技术)成功培育了新种质材料, 紫根水葫芦。在诱导剂作用下, 普通水葫芦幼苗发生了生理性状的变异而缓慢长成了紫根水葫芦。转录组测序结果表明, 普通水葫芦与紫根水葫芦表型的差异仅是由某些基因表达量上下调引

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2010AA06Z301)

收稿日期: 2015-06-04; 修订日期: 2015-07-29

作者简介: 陈文萍(1989—), 女, 硕士, 研究方向: 水生植物生态修复。E-mail: wp_chen2013@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: 563629992@qq.com

起的。且在中国植物志电子查询系统中未见紫根水葫芦的记录,故认为紫根水葫芦和普通水葫芦是同一物种。紫根水葫芦较普通水葫芦叶片小,柄叶短,根系发达,长达80~110 cm,可在水中维持数月不腐烂。紫根水葫芦具有比普通水葫芦更强的净化水质的能力,同时克服了普通水葫芦的疯长、易腐烂、耗氧多等缺点,具有良好的应用前景。本研究以普通水葫芦和紫根水葫芦为研究对象,以广泛存在于工业和城市污水且毒性较大的3种重金属镉、铅、锌为例,比较了两者对重金属的去除能力。以期找到更加绿色环保、高效修复水体污染的水生植物。与此同时,也为后续紫根水葫芦广泛应用于重金属污水的治理提供理论依据和参考,为水体污染的有效治理开辟新路径。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用材料为普通水葫芦和紫根水葫芦,均由云南生态农业研究所提供。实验材料运来广州之后,首先进行恢复性养殖,之后随机选择生长状况良好、植株大小接近的个体进行实验。实验所用容器为容量10 L的塑料桶。培养液的配方为:NaNO₃ 1.7 mmol/L;CaCl₂ 170 μmol/L;KH₂PO₄ 180 μmol/L;MgSO₄ 200 μmol/L;KCl 340 μmol/L;FeSO₄ 5 μmol/L;MnSO₄ 10 μmol/L。

1.2 实验方法

1.2.1 普通水葫芦和紫根水葫芦去除溶液中重金属的实验设计

随机选择生长状况良好、植株大小接近的个体进行实验。设置3个处理组:紫根水葫芦组、普通水葫芦组、对照组,对照组不加实验植株,分别培养于含镉离子(10 mg/L)、铅离子(10 mg/L)、锌离子(10 mg/L)的培养液中6 d。此即吸收阶段。每个处理组设置3个平行。

吸收阶段结束后,将经过重金属实验的植物体取出,并用水冲洗干净,后将其转移至新的无镉、铅、锌的培养液中培养3 d,此即释放阶段。在整个吸收-释放处理过程中,每天需补充植物生长过程中由于蒸发等原因损失的水分至原刻度线,并按时从培养液中取样。取样使用移液管,分3次在培养液不同位置取样,将3次取样样品混合过滤后,使用电感耦合等离子体原子发射光谱检测其中镉、铅、锌的含量,并计算去除率。

普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中3种重金属的去除率计算公式为:

去除率(%)=(吸附前溶液中重金属离子的质量浓度-吸附后溶液中剩余重金属离子的质量浓度)/吸附前溶液中重金属离子的质量浓度×100%。

1.2.2 普通水葫芦和紫根水葫芦对重金属的积累

将经过吸收处理的植物从培养液中取出,用水冲洗并擦干其表面残留的水分,将根部和茎叶分离,分别经过称鲜重、烘干(50℃)、称干重、研磨等前处理后,分别称取0.5 g样品。

将样品放入三角瓶,并加入浓硝酸和高氯酸的混合液(体积比5:1)。放置过夜后,在电热板上进行低温加热至近干。若三角瓶中的液体仍然呈棕黑色,再加混合酸并继续加热。反复以上步骤直至冒白烟,且消化液呈无色透明或略带黄色约剩余1~2 mL时,停止消解。以上步骤均需在通风柜中进行。

待消解液冷却后,倒入25 mL容量瓶中,并用水定容,混匀后使用电感耦合等离子体原子发射光谱检测其中镉、铅、锌的含量。此实验设置普通水葫芦组、紫根水葫芦组、对照组。对照组为不经过吸收处理的水葫芦,并分别检测其体内镉离子、铅离子、锌离子含量,作为植物体内镉离子、铅离子、锌离子起始浓度。每个处理组设置3个平行。

1.3 数据处理

数据以平均数±标准差($\bar{X} \pm SD$)表示。采用R软件对数据进行处理并进行差异显著性检验,当 $p < 0.05$,认为有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中重金属的去除效果

2.1.1 2种水葫芦对溶液中镉离子的去除效果

图1为普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中镉离子的去除效果曲线(吸收阶段)。在本实验条件下,普通水葫芦($p = 6.2 \times 10^{-8} < 0.05$)和紫根水葫芦($p = 4.4 \times 10^{-8} < 0.05$)对溶液中镉离子去除效果均显著。经过2 d的净化,水溶液中的镉离子很快降低到较低水平,之后几天一直持续维持在低水平状态。吸收阶段结束时,2种水葫芦对溶液中镉离子的去除率分别为74.8%和86.0%。同时,紫根水葫芦对镉离子的去除效果显著强于普通水葫芦($p = 0.0028 < 0.05$)。

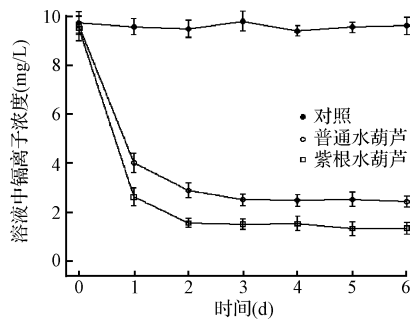


图1 普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中镉离子的去除曲线

Fig. 1 Removal curves of common water hyacinth and purple root water hyacinth on cadmium ion in solution

图2为普通水葫芦和紫根水葫芦对镉离子的释放情况(释放阶段)。由图2可知,在释放阶段,2种水葫芦释放的镉离子在零附近波动,说明只有少量的镉释放,且普通水葫芦和紫根水葫芦均没有显著性差别($p = 0.3422 > 0.05$),故可认为,被水葫芦吸收的镉离子绝大多数均不会被重新释放。Wu等^[16]的研究也支持了此观点。

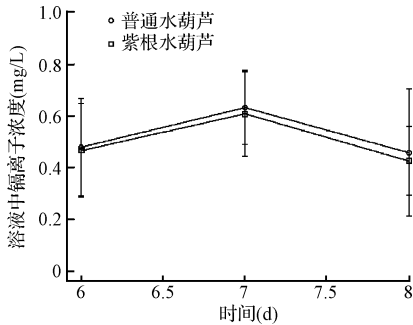


图2 普通水葫芦和紫根水葫芦对镉离子的释放曲线

Fig. 2 Dissolution curves of common water hyacinth and purple root water hyacinth on cadmium ion in solution

2.1.2 2种水葫芦对溶液中锌离子的去除效果

普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中锌离子的去除效果(吸收阶段)如图3所示。与对照组相比,普通水葫芦($p = 2.3 \times 10^{-8} < 0.05$)和紫根水葫芦($p = 1.2 \times 10^{-8} < 0.05$)显著提高了水中锌离子的去除率。在吸收阶段的第一天和第二天,实验组水中锌离子浓度大幅度下降,直到吸收阶段结束,水中锌离子一直保持在低水平。说明水葫芦和紫根水葫芦能在2 d时间内将溶液中的锌离子进行高效的吸收、吸附。此外,紫根水葫芦对锌离子的去除效果明显优于普通水葫芦($p = 0.00018 < 0.05$)。较对照组,普通水葫芦

和紫根水葫芦对溶液中锌离子的最终去除率分别为76.0%和90.1%。

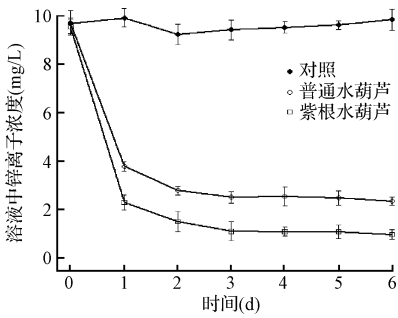


图3 普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中锌离子的去除曲线

Fig. 3 Removal curves of common water hyacinth and purple root water hyacinth on zinc ion in solution

经含锌离子溶液处理后的普通水葫芦和紫根水葫芦对锌离子的释放情况(释放阶段)如图4所示。由图可知,同样出现了少量锌离子被重新释放的现象。同时,在本实验条件下,经过重金属溶液处理后的2种水葫芦没有显著性差别($p = 0.5293 > 0.05$),所以可认为,被水葫芦吸收的锌离子绝大多数均不会被重新释放到水中。

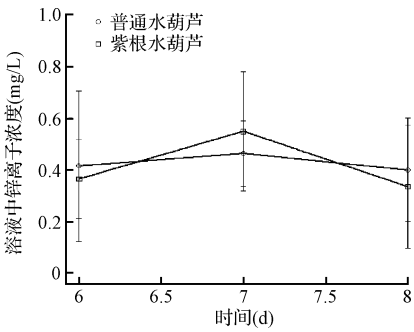


图4 普通水葫芦和紫根水葫芦对锌离子的释放曲线

Fig. 4 Dissolution curve of common water hyacinth and purple root water hyacinth on zinc ion in solution

2.1.3 2种水葫芦对溶液中铅离子的去除效果

普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中铅离子的去除效果(吸收阶段)见图5。紫根水葫芦对铅离子的净化能力强于普通水葫芦($p = 0.0021 < 0.05$)。普通水葫芦($p = 5.1 \times 10^{-9} < 0.05$)和紫根水葫芦($p = 4.4 \times 10^{-9} < 0.05$)对溶液中的铅离子去除效果均明显。2种水葫芦能在2 d之内将水中的铅离子进行高效去除,并达到饱和状态。经过6 d的净化,普通水葫芦、紫根水葫芦对溶液中铅离子的最终

去除率可分别达到 89.2% 和 97.4%。

经含铅离子溶液处理后的普通水葫芦和紫根水葫芦对铅离子的释放情况(释放阶段)如图 6 所示。普通水葫芦和紫根水葫芦对铅离子释放趋于 0,且在本实验条件下,与对照组相比,释放阶段两种水葫芦均没有显著性差异($p > 0.05$),且紫根水葫芦与普通水葫芦之间也不存在显著性差异($p = 0.849\ 9 > 0.05$),因而可认为被水葫芦吸收的铅离子为零释放。

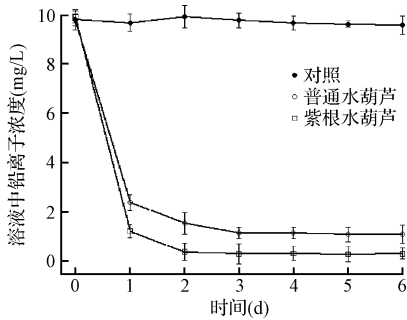


图 5 普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中铅离子的去除曲线

Fig. 5 Removal curves of common water hyacinth and purple root water hyacinth on lead ion in solution

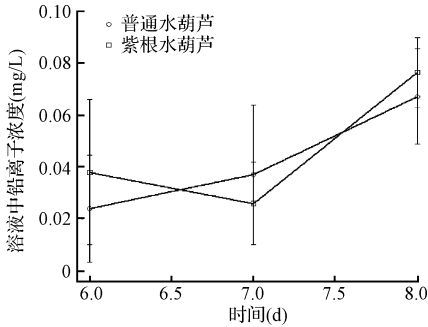


图 6 普通水葫芦和紫根水葫芦对铅离子的释放曲线
Fig. 6 Dissolution curves of common water hyacinth and purple root water hyacinth on lead ion in solution

2.2 重金属在 2 种水葫芦中的积累情况

2.2.1 普通水葫芦和紫根水葫芦体内镉的积累

图 7 为重金属溶液处理前后普通水葫芦和紫根水葫芦体内镉的含量。从图中可以看出,经含镉离子溶液处理后,2 种水葫芦根部和茎部镉的含量均明显升高。实验前,普通水葫芦和紫根水葫芦的根部($p = 0.302\ 8 > 0.05$)和茎叶部($p = 0.416 > 0.05$)的镉含量在自然状态下均没有显著性差异。实验后,只有根部的镉含量存在显著

性差异($p = 0.002\ 086 < 0.05$)。紫根水葫芦根部的镉含量比普通水葫芦根部的镉含量高出约 2 倍。而 2 种水葫芦在重金属溶液处理后茎叶部的镉含量不具有显著性差异($p = 0.172\ 4 > 0.05$),说明紫根水葫芦对镉的积累效果显著强于普通水葫芦。此外,2 种水葫芦茎叶部镉含量远远少于根部,这可能反映了对镉积累分布特征,镉主要积累在根部,根部的贡献大于茎叶部。这与达良俊等^[17]研究结果相符。

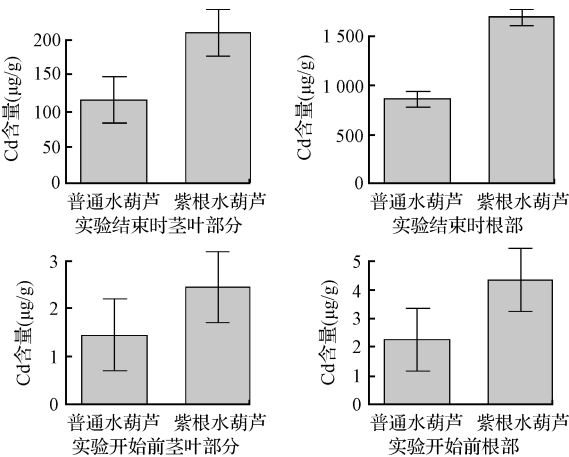


图 7 重金属溶液处理前后普通水葫芦和紫根水葫芦体内镉含量

Fig. 7 Cadmium content in the body of common water hyacinth and purple root water hyacinth before and after treatment with heavy metals solution

2.2.2 普通水葫芦和紫根水葫芦体内锌的积累

重金属溶液处理前后普通水葫芦和紫根水葫芦体内的锌含量如图 8 所示。从图中得知,只有实验后,实验植物体根部的锌含量存在显著性差异($p = 0.005\ 974 < 0.05$),而实验前其根部、实验前后其茎叶部锌含量均不存在显著性差异($p > 0.05$)。经处理后,紫根水葫芦根部锌含量比未处理前高出约 77 倍,而处理后的普通水葫芦根部锌含量比处理前高出仅 10 倍左右,说明紫根水葫芦体内锌积累能力远强于普通水葫芦。此外,紫根水葫芦体内积累的锌比铅、镉高,说明不同重金属在植物体内的积累特征不同,这可能与其本身对特定重金属的亲和性有关^[14]。锌在其体内的积累也表现出与镉一样的分布特征,主要积累于根系。

2.2.3 普通水葫芦和紫根水葫芦体内铅的积累

重金属溶液处理前后普通水葫芦和紫根水

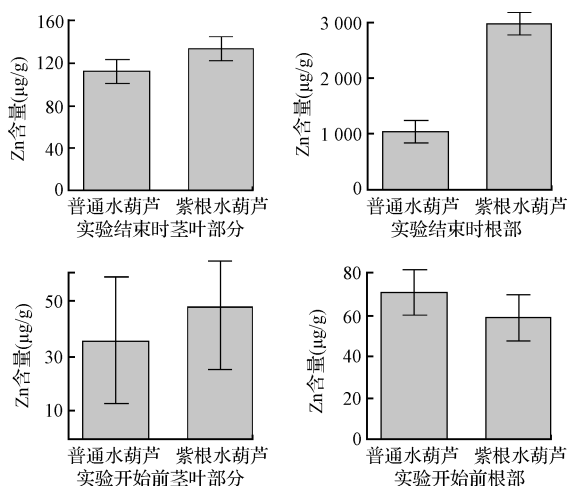


图8 重金属溶液处理前后普通水葫芦和紫根水葫芦体内锌含量

Fig. 8 Zinc content in the body of common water hyacinth and purple root water hyacinth before and after treatment with heavy metals solution

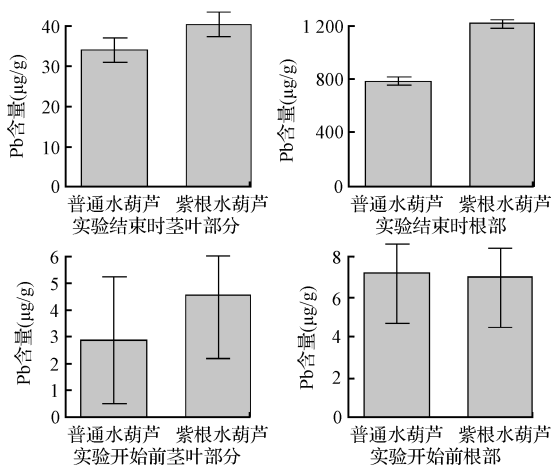


图9 重金属溶液处理前后普通水葫芦和紫根水葫芦体内铅含量

Fig. 9 Lead content in the body of common water hyacinth and purple root water hyacinth before and after treatment with heavy metals solution

葫芦体内的铅含量如图9所示。由图可知,与实验前相比,实验后普通水葫芦和紫根水葫芦茎叶部铅含量均高出10倍左右。但实验前后,两者茎叶部铅含量都不具有显著性差异($p > 0.05$),说明其茎部铅积累没有显著性差别。实验后普通水葫芦和紫根水葫芦根部铅含量较实验前高出约140倍。处理前,2种水葫芦根部铅含量未见显著性差异($p = 0.9593 > 0.05$),而经处理后,两者根部铅含量显现出显著性差异($p = 0.001262 < 0.05$),从而说明了普通水葫芦和紫

根水葫芦体内铅的积累具有显著性差异。另外,根部铅的积累远高于茎部铅的积累,说明铅的富集主要集中于根部。这与董小霞等^[18]和纪苗苗等^[19]的研究结果是一致的。

3 讨论

普通水葫芦和紫根水葫芦去除溶液中重金属的实验结果表明,2种水葫芦均能显著有效地去除水中的重金属($p < 0.05$),且紫根水葫芦对镉、铅、锌这3种重金属的去除能力显著强于普通水葫芦($p < 0.05$)。这与水葫芦根系的吸附、吸收作用是息息相关的。一方面,水葫芦根系发达,须根飘散在水中,为各种微生物构建了理想的栖息场所,而根系微生物系统能够将吸附在水葫芦根部的污染物质进行有效降解^[20];另一方面,水葫芦发达的根系与水体接触面积大,形成了一道密集的过滤层,可以直接黏附和吸附污水中的不溶性胶体物质。正由于水葫芦这样庞大的根际过滤作用促使其根系吸附了大量的重金属,从而达到去除水中重金属的目的。而达良俊等^[17]推测水葫芦的根系能吸附大量重金属,可能是由于其根系分泌了一些能够大量吸附水体中重金属的分泌物。此外,重金属通过与根系细胞壁表面的交换位点进行离子交换,或参与根系表面有机官能团的配位、螯合作用而被根系吸收^[21]。而紫根水葫芦根系较普通水葫芦的根系更为庞大,就单株而言,紫根水葫芦根系的生物量约是普通水葫芦的7~20倍,可以吸附、吸收更多的重金属,这可能是紫根水葫芦比普通水葫芦具有更强的去除重金属能力的原因之一。而此推测在我们课题组先前的研究中得到了印证:利用新一代高通量测序技术测紫根水葫芦和普通水葫芦的转录组,结果发现,叶子有481个显著差异基因,根有2340个显著差异基因。在分子功能这类基因中紫根水葫芦有较多的钙离子结合物,锌离子结合物,金属离子结合物,这为紫根水葫芦能吸附、吸收更多的重金属提供了有力的证明。

普通水葫芦和紫根水葫芦对重金属的积累实验结果表明,镉、铅、锌这3种重金属均能在水葫芦体内累积,且紫根水葫芦对重金属的积累能力明显高于普通水葫芦。此外,重金属在水葫芦体内的积累具有明显的分布特征,根部的重金属含量显著高于茎叶部($p < 0.05$),说明重金属主要积累于根部。重金属在植物体内的积累,是一系列物理、化学、生

物反应的统一,包括重金属离子螯合、离子交换等物理和化学过程,也包括根细胞吸收、细胞内运转和贮存以及运转到茎叶这些生物学过程,这些过程的结合产生了重金属从溶液中被富集的非线性动力学。此外,也有可能是由于水体中重金属含量过高,迫使植物被动吸收重金属,而出于本能植物会利用新陈代谢将重金属积累在新陈代谢缓慢并对植物生长不构成严重威胁的根部^[22],这也是水葫芦根系部能吸收大量重金属的机理之一。在实验中,对于不同的重金属,水葫芦表现出不同的吸收能力、累积特征,这可能与其本身对特定重金属的亲 and 性有关^[14]。此外,有研究表明,水葫芦体内腐殖酸的量和水葫芦与金属结合能力直接相关^[23]。而对于不同金属,水葫芦也表现出不同的释放特征,这可能与植物本身对特定金属的耐受性相关。

对于处理过重金属的紫根水葫芦的处置问题,也是我们所关注的重点问题。富集了重金属的紫根水葫芦有以下几种处理方法:

(1)可作为生物吸附剂而被二次利用。富集了重金属的紫根水葫芦根系晒干后可研磨成粉末,然后通过物理或化学方法将重金属重新析出,剩下的根系粉末(占紫根水葫芦生物量 80% 以上)可作为一种新型可生物降解的吸附剂,比如吸附砷^[24]等重金属,这为紫根水葫芦的后续资源化开发利用提供了重要的途径。

(2)可经过焚烧,对其重金属进行回收。水葫芦含水量高达 94% 以上,富集了重金属的水葫芦晒干后可进行焚烧,灰分只占整体的 3% ~ 4%,剩下的大部分是被富集的重金属,可进行回收处理。这是一种彻底且不会造成重金属二次污染的方法。

(3)可进行填埋处理。积累了重金属的紫根水葫芦可经过焚烧后分处填埋。因为土壤对重金属的耐受力远大于水。比如污水中镉和汞的排放标准为不超过 0.1 mg/L 和 0.05 mg/L,而土壤中镉和汞含量标准为不超出 1.0 mg/kg 和 1.5 mg/kg。

4 结 论

(1)普通水葫芦和紫根水葫芦对溶液中的镉、铅、锌离子均具有显著的去除效果($p < 0.05$),在本实验条件下,对这 3 种重金属的去除率均在 70% 以上,具有良好的应用前景。且紫根水葫芦对这 3 种重金属的去除效果均显著性的强于普通水葫芦($p < 0.05$),在本实验条件下,紫根水葫芦对 3 种重

金属的去除率均达到了 86% 以上。同时,被普通水葫芦和紫根水葫芦吸收的重金属,绝大部分不会被再次释放到外界环境中。说明利用水葫芦去除水中重金属是绿色环保的,不会造成二次污染。

(2)镉、铅、锌在水葫芦体内大量积累,且紫根水葫芦对重金属的积累能力强于普通水葫芦。此外,镉、铅、锌在水葫芦体内的积累具有明显的分布特征,重金属主要积累于其根部,初步显示了水葫芦对重金属的积累特征。

(3)紫根水葫芦对重金属的净化效果优于普通水葫芦,可作为一种新型改良的植物品种对受重金属污染的水体进行修复。此外,据国家 863 课题研究发现,紫根水葫芦每公斤干根粉最多可吸收铅 131 g,吸收镉 80 g。如将其应用到重金属污染稻田的治理,将会使稻田重金属含量大大减少,这有可能成为治理重金属污染稻田快速、安全、低成本的重要途径。

参 考 文 献

- [1] 黄勇. 浅析重金属污染现状及治理技术研究进展. 低碳世界, 2014(1): 9-10
- [2] 朱映川, 刘雯, 周遗品, 等. 水体重金属污染现状及其治理方法研究进展. 广东农业科学, 2008(8): 143-146
Zhu Yingchuan, Liu Wen, Zhou Yipin, et al. Reused path of heavy metal pollution in hydro-environment and its research advance. Guangdong Agricultural Sciences, 2008(8): 143-146(in Chinese)
- [3] 史志进. 浅析水体重金属污染的危害及生物监测方法. 科技致富向导, 2011(4): 297
Shi Zhijin. Analyses the harm and biological monitoring method of heavy metal pollution in water. Guide of Sci-Tech Magazine, 2011(4): 297(in Chinese)
- [4] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理. 生态学报, 2013, 33(13): 3898-3906
Luo Qiaoyu, Wang Xiaojuan, Lin Shuangshaung, et al. Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal Fungi. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 3898-3906(in Chinese)
- [5] Machado M. D., Soares E. V., Soares H. M. V. M. Selective recovery of chromium, copper, nickel, and zinc from an acid solution using an environmentally friendly process. Environmental Science and Pollution Research, 2011, 18(8): 1279-1285
- [6] Mthombo T. S., Mishra A. K., Mishra S. B., et al. The

- adsorption behavior of Cu (II), Pb (II), and Co (II) of ethylene vinyl acetate-clinoptilolite nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, **2011**, 121(6): 3414-3424
- [7] 秦恒飞, 刘婷逢, 周建斌. $\text{Na}_2\text{S} \cdot \text{HNO}_3$ 改性活性炭对水中低浓度 Pb^{2+} 吸附性能的研究. *环境工程学报*, **2011**, 5(2): 306-310
- Qin Hengfei, Liu Tingfeng, Zhou Jianbin. Research on adsorbing low concentration Pb^{2+} in water by $\text{Na}_2\text{S} \cdot \text{HNO}_3$ modified activated carbon. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2011**, 5(2): 306-310 (in Chinese)
- [8] Valderrama A., Tapia J., Penailillo P., et al. Water phytoremediation of cadmium and copper using *Azolla filiculoides* Lam. in a hydroponic system. *Water and Environment Journal*, **2013**, 27(3): 293-300
- [9] Sahu G., Sahoo S., Rath S. P. Bio-absorption of biochemical study of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) with reference to chromium and cadmium. *Advances in Plant Sciences*, **2014**, 27(2): 311-316
- [10] Sharma S., Singh B., Manchanda V. K. Phytoremediation: Role of terrestrial plants and aquatic macrophytes in the remediation of radionuclides and heavy metal contaminated soil and water. *Environmental Science and Pollution Research*, **2015**, 22(2): 946-962
- [11] Mahamadi C., Nharingo T. Competitive adsorption of Pb^{2+} , Cd^{2+} and Zn^{2+} ions onto *Eichhornia crassipes* in binary and ternary systems. *Bioresource Technology*, **2010**, 101(3): 859-864
- [12] Tel-Or E., Forni C. Phytoremediation of hazardous toxic metals and organics by photosynthetic aquatic systems. *Plant Biosystems*, **2011**, 145(1): 224-235
- [13] 郑建初, 盛婧, 张志勇, 等. 凤眼莲的生态功能及其利用. *江苏农业学报*, **2011**, 27(2): 426-429
- Zheng Jianchu, Sheng Jing, Zhang Zhiyong, et al. Ecological function of hyacinth and its utilization. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, **2011**, 27(2): 426-429 (in Chinese)
- [14] Tiwari S., Dixit S., Verma N. An Effective means of bio-filtration of heavy metal contaminated water bodies using aquatic weed *Eichhornia crassipes*. *Environmental Monitoring and Assessment*, **2007**, 129(1-3): 253-256
- [15] 蒋伟军, 颜幼平, 李萍. 水葫芦资源化利用综述. *水资源保护*, **2010**, 26(6): 79-83
- Jiang Weijun, Yan Youping, Li Ping. Progress in resources utilization of eichharnia crassipes. *Water Resources Protection*, **2010**, 26(6): 79-83 (in Chinese)
- [16] Wu J. S., Ho T. C., Chien H. C., et al. Characterization of the high molecular weight Cd-binding complex in water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) when exposed to Cd. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **2008**, 56(14): 5806-5812
- [17] 达良俊, 陈鸣. 凤眼莲不同部位对重金属的吸收、吸附作用研究. *上海环境科学*, **2003**, 22(11): 765-767
- Da Liangjun, Chen Ming. Heavy metal content in different parts of *Eichhornia crassipes* and adsorption of its root system. *Shanghai Environmental Sciences*, **2003**, 22(11): 765-767 (in Chinese)
- [18] 董小霞, 颜昌宙, 王灶生, 等. 组合式水生植物净化系统对 Cu、Pb 和 Cd 的去除与生物富集特征. *环境工程学报*, **2014**, 8(4): 1447-1453
- Dong Xiaoxia, Yan Changzhou, Wang Zaosheng, et al. Removal efficiency and accumulation characteristics of Cu, Pb and Cd in combined purification systems. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2014**, 8(4): 1447-1453 (in Chinese)
- [19] 纪苗苗, 林波, 吴跃明, 刘建新. 不同水域中水葫芦对铅、镉、铬、汞的富集规律研究. *草业科学*, **2010**, 27(7): 1-4
- Ji Miaomiao, Lin Bo, Wu Yueming, et al. Study on the enrichment patterns of Pb, Cd, Cr and Hg in water hyacinth in different water areas. *Pratacultural Science*, **2010**, 27(7): 1-4 (in Chinese)
- [20] Kim J., Kim W. J. Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds. *Water Research*, **2000**, 34(13): 3285-3294
- [21] 蔡成翔, 王华敏, 张宗明. 水葫芦对五种重金属离子的去除速率与富集机制研究. *广西右江民族师专学报*, **2002**, 15(6): 48-51
- Cai C. X., Wang H. M., Zhang Z. M. Studies on beneficitation mechanism and speed rate of removal of five heavy metallic ions by water gourd. *Journal of Youjiang Teachers College for Nationalities Guangxi*, **2002**, 15(6): 48-51 (in Chinese)
- [22] 孔牧, 任天祥. 植物体内元素吸收积累初步研究. *物探与化探*, **1999**(1): 33-37
- [23] Ghabbour E. A., Davies G., Lam Y. Y., et al. Metal binding by humic acids isolated from water hyacinth plants (*Eichhornia crassipes* [Mart.] Solm-Laubach: Pontedericeae) in the Nile Delta, Egypt. *Environmental Pollution*, **2004**, 131(3): 445-451
- [24] Lin Sen, Wang Guoxing, Na Zhongyuan, et al. Long-root *Eichhornia crassipes* as a biodegradable adsorbent for aqueous As(III) and As(V). *Chemical Engineering Journal*, **2012**, 183: 365-371