

## 水葫芦对重金属镉和铬的长期富集效应

李玲, 李森, 樊华, 苟小林, 涂卫国 (四川省自然资源科学研究院, 四川成都 610015)

**摘要** [目的]探讨重金属复合作用下水葫芦富集能力的变化情况。[方法]通过为期2个月的室内水培模拟试验研究水葫芦对重金属镉、铬长期富集效果。[结果]水葫芦有较强镉转运能力,叶片也是富集镉的主要部位,最高可达根含量的77%以上。水葫芦对铬转运能力较低,叶片铬含量仅为根的10%~22%。镉、铬复合作用下,铬对镉的表现有拮抗作用,尤其是在叶片中。相反,镉对铬的影响规律不明显,叶中低铬浓度下(1.00 mg/L)抑制铬积累,高铬浓度下(4.00 mg/L)则促进,而该2个浓度下对根均无显著影响,可能主要影响了铬的转运。[结论]水葫芦根系镉和铬最高含量可达6 600 mg/kg和7 300 mg/kg以上,表明其较强镉、铬污染修复能力在重金属污染水体修复上具有良好的应用价值。

**关键词** 水葫芦;重金属复合污染;植物修复;长期富集效应

**中图分类号** S501 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)24-034-04

Study on the Long-term Accumulation of Cadmium and Chromium in Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*)

LI Ling, LI Sen, FAN Hua et al (Sichuan Province Natural Resources Science Research Institute, Chengdu, Sichuan 610015)

**Abstract** [Objective] The aim was to discuss the change of *Eichhornia crassipes* enrichment ability under heavy metal compound pollution. [Method] The indoor hydroponic experiment was carried to study the long term uptake and accumulation of Cd and Cr in *E. crassipes* in two months. [Result] The results showed that there was a strong Cd transport capacity in *E. crassipes*, and the leaf was also the main part of Cd accumulation, which could reach more than 77% of the content of the root. However, the Cr transport from root to leaf was low in *E. crassipes*, Cr content in leaves was only 10%~22% in that of the root. Cr showed a negative effect on Cd accumulation in *E. crassipes*, especially in the leaves. However, the effects of Cd on Cr accumulation was not obvious, Cd showed negative effect under low Cr concentrations (1.00 mg/L) and positive effect under high Cr concentrations (4.00 mg/L) on leaf Cr accumulation, but had no effect on root Cr content under these two concentration, it seems that Cd had mainly effected the transport capacity of Cr. [Conclusion] The highest content of Cd and Cr in *E. crassipes* are more than 6 600 and 7 300 mg/kg respectively, which indicates that it has a strong ability on the remediation of Cd and Cr pollution, and has good application value in heavy metal polluted water restoration.

**Key words** *Eichhornia crassipes*; Heavy metal compound pollution; Phytoremediation; Long-term accumulation effect

重金属污染指由重金属或其化合物造成的环境污染,主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属超标制品等人为因素所致<sup>[1]</sup>。当前我国重金属污染形势严峻,全国耕地土壤重金属超标率占19.4%,污水灌区重金属污染土壤高达总面积的64.8%,大量农产品中重金属含量超标或已接近临界值<sup>[2]</sup>。我国各大江河湖库底质重金属污染率高达80.1%,已经开始影响水质安全<sup>[3]</sup>。然而,重金属由于不能被微生物降解,在环境中只能发生各种形态之间的相互转化,其污染的消除往往更为困难。目前,植物修复技术是研究热点,主要是利用植物对重金属的富集作用,通过植物转移、容纳或转化降低土壤和水体中重金属浓度或毒性,使其对环境无害相对于传统方法<sup>[4-5]</sup>。

水葫芦,又名凤眼蓝,原产于巴西,为雨久花科凤眼蓝属多年生宿根浮水草本植物,其须根很发达,分蘖繁殖快,常常由于过度繁殖,抢占水面而泛滥成灾,在我国被列入外来入侵植物名录。从另一方面来看,水葫芦生长旺盛、生物量大,根系吸收力强,因此在可控范围内,是一种理想的水质污染修复植物。研究表明,水葫芦不仅能去除水中N、P养分,在富集Cu、Cd、Cr等重金属元素也有良好效果<sup>[6]</sup>。目前,研究者针对水葫芦重金属修复作用开展了大量研究,主要集中在水葫芦根系吸附<sup>[7]</sup>、根系去除机理<sup>[8]</sup>、毒害作用<sup>[9-10]</sup>、1~10 d

内的短期去除效果<sup>[11-12]</sup>等方面,对于处理时间较长、揭示地下水地上富集规律的研究开展很少。鉴于此,笔者通过2个月的试验研究了不同镉、铬浓度处理下水葫芦地下水地上富集作用规律,探讨了重金属复合作用下水葫芦富集能力的变化情况,以期水葫芦在重金属污染修复上的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

**1.1 材料** 试验材料采自四川省广安市武胜县五排水库,采集时选择刚从母株上萌发出的新苗,带回试验区域,进行水培,水培液里加入适量的美乐棵营养液,待水葫芦幼苗生长至具有5~6张叶片后,选择生长状态良好、长势一致的水葫芦进行重金属镉和铬处理。

**1.2 试验设计** 试验处理时间为2014年8~10月持续2个多月,除对照以外,试验水葫芦分为3组,分别进行单独镉处理、单独铬处理和镉复合铬处理。单独镉处理中,设置4个镉处理浓度,分别为0.50、1.00、2.00、4.00 mg/L氯化镉。单独铬处理中,设置4个铬处理浓度,分别为1.00、2.00、3.00、4.00 mg/L硝酸铬。镉复合铬处理中,设置4个处理浓度,分别为0.50 mg/L氯化镉复合1.00 mg/L硝酸铬(0.50Cd+1.00Cr)、1.00 mg/L氯化镉复合2.00 mg/L硝酸铬(1.00Cd+2.00Cr)、2.00 mg/L氯化镉复合3.00 mg/L硝酸铬(2.00Cd+3.00Cr)、4.00 mg/L氯化镉复合4.00 mg/L硝酸铬(4.00Cd+4.00Cr)。每个试验处理设5次重复。试验处理中,在水培液中加入适量美乐棵营养液,保证植物生长所需营养。试验期间,每7 d更换1次水培液,保持重金属处理浓度和消除藻类生长造成的影响。

**基金项目** 四川省科技支撑计划项目(2015SZ0205);四川省成都市科技惠民技术研发项目(2014-HM01-00171-SF)。

**作者简介** 李玲(1982-),女,土家族,贵州印江人,助理研究员,博士,从事植物生理生态学研究。

**收稿日期** 2016-06-13

**1.3 测定方法** 试验结束时,收获所有水葫芦,将水葫芦分为根、叶片和叶柄 3 个部分,经过烘干,磨粉后分别测定各个部位的重金属元素镉和铬的含量,计算各个部位的富集倍数,富集倍数用处理下元素的含量除以对照下元素含量计算。由于水葫芦茎为短缩茎,当年生茎生物量很少,所以未考虑茎的重金属富集效应。

**1.4 数据处理** 所有试验数据均使用 SPSS16.0 软件对进行一元方差分析(ANOVA),平均数间的多重比较采用 Turkey 检验( $P < 0.05$ )以表现不同部位间和不同处理浓度下的显著性差异。

## 2 结果与分析

**2.1 不同浓度镉单独处理下水葫芦的富集作用** 由表 1 可知,在不同浓度镉单独处理下,随着镉处理浓度的升高,水葫芦根、叶片和叶柄镉含量持续显著性增加。在各个处理条件下,水葫芦不同部位的镉含量也有显著性差异,表现为根 > 叶片 > 叶柄,从低到高的 4 个镉处理浓度下,根镉含量分别是叶片含量的 3.07 倍、2.52 倍、1.81 倍和 1.29 倍,是叶柄含量的 6.35 倍、4.54 倍、3.38 倍和 3.23 倍。从富集倍数上来看,随着镉处理浓度的升高,水葫芦根、叶片和叶柄镉富集倍数也持续显著性增加,且不同部位的镉富集倍数具有显著性

表 1 不同浓度镉单独处理下水葫芦不同部位镉含量与富集倍数

Table 1 Cd content and enrichment times in different parts of *E. crassipes* treated by different concentrations of Cd

指标 Indicators	处理浓度 Processing concentration // mg/L	叶片 Leaf	叶柄 Leaf stalk	根 Root
镉含量 Cadmium content // mg/kg	CK	40.82 ± 1.94 aB	28.63 ± 2.36 aA	145.75 ± 10.62 aC
	0.50	644.15 ± 32.02 bB	311.15 ± 20.58 bA	1 974.76 ± 98.61 bC
	1.00	1 231.18 ± 64.47 cB	684.10 ± 50.36 cA	3 105.23 ± 128.38 cC
	2.00	2 414.07 ± 172.67 dB	1 291.63 ± 38.56 dA	4 360.25 ± 70.31 dC
	4.00	5 124.35 ± 56.85 eB	2 045.51 ± 151.12 eA	6 605.01 ± 336.72 eC
富集倍数 Enrichment times	0.50	15.78 ± 0.05 ①C	10.89 ± 0.53 ①A	13.58 ± 0.79 ①B
	1.00	30.16 ± 0.37 ②B	23.95 ± 1.56 ②A	21.43 ± 2.47 ②A
	2.00	59.10 ± 1.49 ③C	45.31 ± 3.26 ③B	30.03 ± 2.33 ③A
	4.00	125.78 ± 7.29 ④C	71.61 ± 4.37 ④B	45.38 ± 1.62 ④A

注:数字后的大写字母表示不同部位之间的显著性差异;小写字母和圈内数字分别表示不同处理下镉含量显著性差异和富集倍数显著性差异。

Note: Data followed by capital letters stand for significant difference among various parts; lowercases and number in circles stand for significant difference of Cd content and enrichment times respectively under different treatments.

差异,与镉含量结果不同,在各个浓度处理下表现为叶片的富集倍数最高。

**2.2 不同浓度铬单独处理下水葫芦的富集作用** 由表 2 可知,与水葫芦对镉的富集作用结果不同,随着铬处理浓度的升高,水葫芦叶、叶柄和根的铬含量并未持续显著性增加。在从低到高 4 个铬浓度中,3.00 mg/L 铬处理时根和叶片具有最高的铬含量。在不同的部位中,根表现出最高的铬含

量,而叶片和叶柄铬含量无显著性差异,从低到高的 4 个铬浓度下,根铬含量分别是叶片含量的 4.54 倍、5.43 倍、7.68 倍和 6.21 倍,分别是叶柄含量的 4.70 倍、5.79 倍、9.28 倍和 7.91 倍。从富集倍数上看,随着铬浓度的升高,叶片和叶柄铬的富集倍数无显著性差异,根仍然在 3.00 mg/L 铬处理下具有最高的富集倍数,且不同部位中根具有最高的富集倍数,而叶片的富集倍数最低。

表 2 不同浓度铬处理下水葫芦不同部位铬含量与富集倍数

Table 2 Cr content and enrichment times in different parts of *E. crassipes* treated by different concentrations of Cr

指标 Indicators	处理浓度 Concentration // mg/L	叶片 Leaf	叶柄 Leaf stalk	根 Root
铬含量 Cr content // mg/kg	CK	40.61 ± 5.39 aB	30.74 ± 2.42 aA	96.61 ± 9.16 aC
	1.00	845.25 ± 31.95 bA	817.11 ± 42.63 cA	3 837.62 ± 112.75 bB
	2.00	824.32 ± 29.54 bA	756.22 ± 30.12 cA	4 474.80 ± 172.98 cB
	3.00	953.20 ± 23.06 cA	789.22 ± 42.55 cA	7 323.04 ± 135.46 eB
	4.00	830.58 ± 18.04 bA	651.86 ± 14.94 bA	5 233.06 ± 153.10 dB
富集倍数 Enrichment times	1.00	21.00 ± 2.06 ①A	28.72 ± 2.54 ①B	37.98 ± 2.30 ①C
	2.00	20.61 ± 3.55 ①A	26.61 ± 2.69 ①B	44.27 ± 2.47 ①②C
	3.00	23.71 ± 2.71 ①A	27.74 ± 2.41 ①B	72.52 ± 5.31 ③C
	4.00	20.74 ± 3.27 ①A	22.98 ± 2.77 ①A	51.79 ± 3.13 ②B

注:数字后的大写字母表示不同部位之间的显著性差异;小写字母和圈内数字分别表示不同处理下铬含量显著性差异和富集倍数显著性差异。

Note: Data followed by capital letters stand for significant difference among various parts; lowercases and number in circles stand for significant difference of Cr content and enrichment times respectively under different treatments.

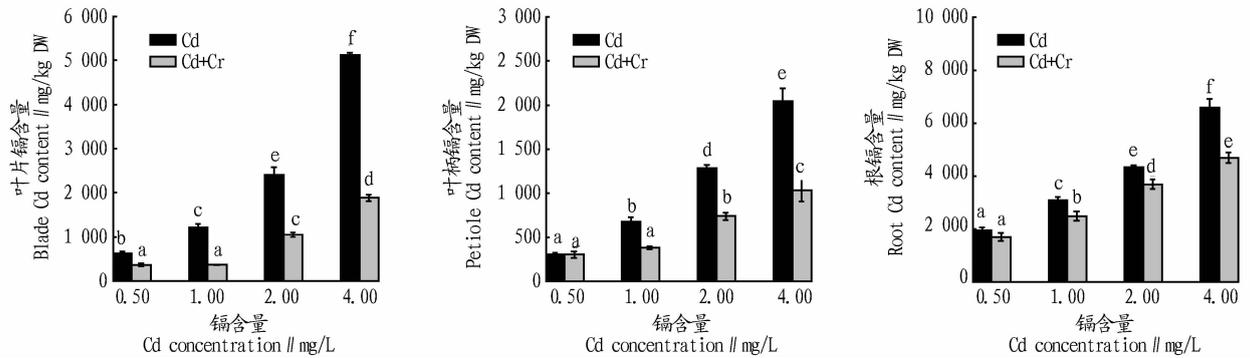
### 2.3 不同浓度镉、铬复合处理下水葫芦的富集作用

**2.3.1 复合处理下水葫芦对镉的富集作用。**从图 1 可知,与单独镉处理下相似,镉铬复合处理下水葫芦根、叶片和叶柄的镉含量随处理浓度的升高而增加。然而,与单独镉处理

下相比,复合处理下水葫芦各部位镉含量随浓度升高而增加的程度却有所下降。除了 0.50 mg/L 处理下的叶柄和根以外,镉铬复合处理下水葫芦叶、叶柄和根的镉含量均显著低于平行单独镉处理下的镉含量。在不同部位中,与单独镉处

理下相比,复合处理下镉含量下降程度为叶片>叶柄>根,在1.0、2.0、4.0 mg/L 镉浓度处理下,叶片镉含量分别下降了69.43%、56.25%和62.96%,叶柄镉含量分别下降了

43.54%、42.43%和49.15%,而根镉含量分别下降了19.22%、15.08%和28.74%。



注:柱上不同字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。

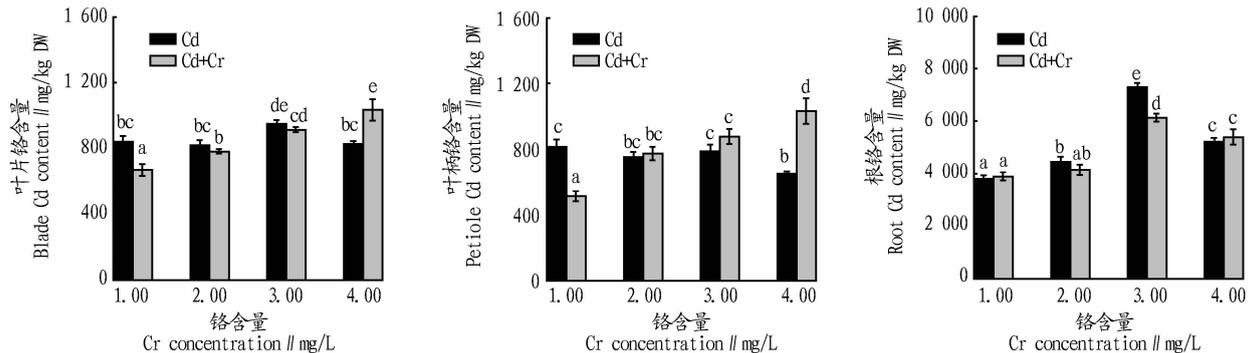
Note: Different letters in the column stand for significant difference at 0.05 level among various treatments.

图1 复合处理下水葫芦不同部位镉含量

Fig.1 Cd content in different parts of *E. crassipes* under compound treatment

2.3.2 复合处理下水葫芦对铬的富集作用。由图2可知,与单独铬处理下有所差异,镉铬复合处理下叶片和叶柄的铬含量随处理浓度的升高而持续增加。然而,根铬含量与单独铬处理结果一致,在3.00 mg/L 铬浓度下最高,在4.00 mg/L 浓度下反而下降。与图1中镉的富集作用结果不同,与单独铬处理相比,镉铬复合处理下水葫芦根、叶和叶柄铬含量并

未出现规律性的下降现象。在1.00 mg/L 铬处理下,复合处理下叶、叶柄铬含量显著低于单独铬处理下,然而在4.00 mg/L 铬处理下,结果却相反,复合作用下的叶、叶柄铬含量却显著高于单独铬处理下。对于根而言,在3.00 mg/L 铬浓度下,复合作用下的铬含量显著低于单独铬处理,而在其他浓度下,单独处理与复合处理间无显著性差异。



注:柱上不同字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。

Note: Different letters in the column stand for significant difference at 0.05 level among various treatments.

图2 复合处理下水葫芦不同部位铬含量

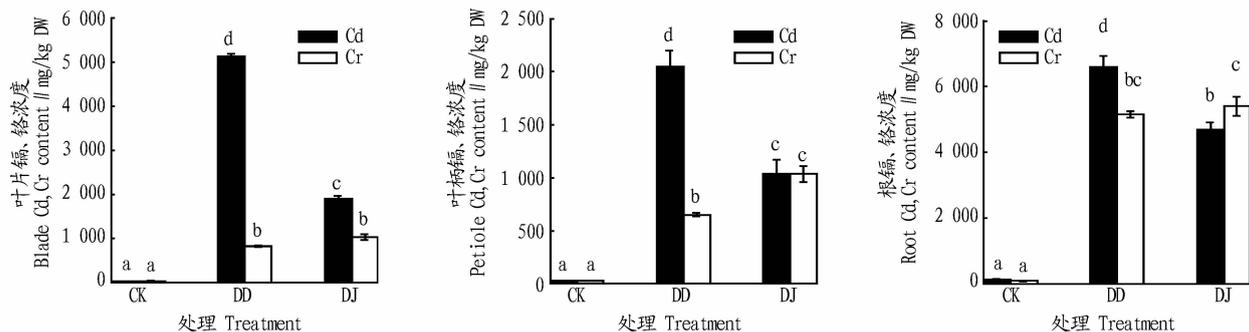
Fig.2 Cr content in different parts of *E. crassipes* under compound treatment

2.3.3 复合处理下水葫芦对镉、铬的富集作用对比。由图3可知,在对照情况下,水葫芦根、叶柄和叶片的镉和铬含量无显著性差异。在单独处理下,水葫芦对镉的富集作用明显高于对铬的富集作用,特别是叶片和叶柄,在4.00 mg/L 同等浓度单独处理下,叶片、叶柄和根的镉含量分别是铬含量的6.17倍、3.14倍和1.28倍。在镉铬复合处理下,水葫芦叶片镉含量仍然比铬含量高45.31%,然而根却相反,镉含量比铬含量低14.92%。在复合处理下,叶柄镉、铬含量无显著性差异。

### 3 讨论与结论

水葫芦对重金属的富集作用被认为主要与根有关,水葫芦根系长,须根发达,根毛丰富,加上水中悬浮颗粒附着,增

加了吸附表面积,根系因而能够吸附大量重金属离子<sup>[13]</sup>。重金属离子被水葫芦吸收后,大部分停留在根部,少量开始向地上部分迁移,从根到茎叶的转运过程受到元素类型、重金属浓度及水环境等因素的影响<sup>[14]</sup>。该研究结果显示,水葫芦根、叶柄和叶片镉含量随着处理浓度的升高而增加,叶片的镉累积量最高超过5 000 mg/kg,在根系含量的77%以上,表明水葫芦具有较好的镉转移运输能力,叶片也是水葫芦富集镉的主要部位。在实践中可以通过定期去除地上部分的方式,提高水葫芦根系对镉污染的去除效果。与镉相比,水葫芦对重金属铬的转运能力较低,叶片铬含量仅为根的10%~22%,且在高铬浓度下出现了富集饱和现象,表明较低的向上运输能力限制了根对铬的吸收。



注:DD表示4.00 mg/L镉、4.00 mg/L铬浓度单独处理;DJ表示4.00 mg/L镉与4.00 mg/L铬复合处理;柱上不同字母表示不同处理间在0.05水平差异显著。

Note:DD.4.00 mg/L Cd,4.00 mg/L Cr individual treatment;DJ.4.00 mg/L Cd,4.00 mg/L Cr compound treatment;Different letters in the column stand for significant difference at 0.05 level among various treatments.

图3 单独与复合处理下各部位镉、铬含量

Fig.3 Cd,Cr content in different parts of *E. crassipes* under individual and compound treatment

目前,在污染水体中单一重金属污染比较少见,大多数情况下是多种重金属共存产生复合污染,不同重金属污染共存时表现为相加、协同、拮抗、独立等多种相互关系<sup>[15]</sup>。该研究中,铬复合作用下水葫芦中镉含量整体大幅下降,尤其是叶片,最高下降了70%,表明铬减弱了水葫芦对镉的富集效应,主要原因可能在于减弱了镉从地下到地上的运输作用。由于作用方式和途径相似,不同重金属在土壤或水体、代谢系统及细胞表面等结合位点存在相互竞争,通常竞争力强的会取代相对弱勢的污染物,竞争程度与污染物种类、浓度比和各自的吸附特性等因素有关<sup>[16]</sup>。在小白菜组织中,镉量与铬量呈极显著正相关<sup>[17]</sup>,而在青菜中镉对铬的作用随着铬浓度的增加表现为“加剧-减弱-加剧”的模式<sup>[18]</sup>。该研究中,镉复合下水葫芦铬含量变化规律不明显,在低铬浓度下(1.00 mg/L)镉降低了叶片和叶柄铬吸收量,在高铬浓度下(4.00 mg/L)作用却相反,而这2个浓度下对根均无显著影响,表明镉可能影响了铬从根到叶的运输作用,具体原因有待进一步研究。

镉是我国最主要的重金属污染元素,在全国耕地土壤中镉超标率高达7.0%,是所有重金属污染中超标率最高的元素,水稻等农作物镉超标事件时有发生,铬在全国耕地中的超标率为1.1%,二者均为我国重点重金属污染物<sup>[19]</sup>。该研究中,水葫芦根对镉和铬的最高耐受浓度可在4 mg/L以上和3 mg/L左右,最高富集含量可达6 600 mg/kg和7 300 mg/kg以上,富集倍数可达45倍和72倍,表明其较强重金属镉、铬污染修复能力,结合其生长快速、分蘖萌发能力强等特点,通过人为控制和定期去除的方式,在污染水体修复上具有良好的应用价值。

### 参考文献

- [1] 王建龙,陈灿. 重金属污染生物治理的原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [2] 马宁远,刘鲁新,蔺彩霞,等. 植物修复技术在重金属污染土壤中的应用[J]. 新疆农业科技,2008(3):31-32.
- [3] 周怀东,彭文启. 水污染与水环境修复[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [4] MOFFAT A S. Plants proving their worth in toxic metal clean up[J]. Science,1995,269:302-303.
- [5] ERDEI L,MEZŐSI G,MÉCS I,et al. Phytore-mediation as a program for decontamination of heavy-metal polluted environment[J]. Acta biologica szegediensis,2005,49:75-76.
- [6] 张文明,王晓燕. 水葫芦在水生态修复中的研究进展[J]. 江苏环境科技,2007,20(1):55-58.
- [7] 张永奇,杨显万. 凤眼莲对铜离子的生物吸附研究[J]. 中国稀土学报,2004,22(Z1):472-475.
- [8] 郑家传. 利用水葫芦根系去除水中重金属的效率和机理研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [9] 李裕红,黄小瑜,林智勇. Pb<sup>2+</sup>对凤眼莲光合作用的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(5):1338-1340.
- [10] 陈海林. 水葫芦的抗氧化研究[D]. 广州:广东工业大学,2012.
- [11] 谭彩云,林玉满,陈祖亮. 凤眼莲净化水中重金属的研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2009(4):47-52.
- [12] 叶雪均,邱树敏. 3种草本植物对Pb-Cd污染水体的修复研究[J]. 环境工程学报,2010(4):1023-1026.
- [13] 陈瑛,金叶飞,王秀琴,等. 水葫芦各部位富集能力的研究[J]. 环境保护科学,2004,30(3):31-37.
- [14] MISHRA V K,UPADHYAYA A R,PANDEY S K,et al. Heavy metal pollution induced due to coal mining effluent on surrounding aquatic ecosystem and its management through naturally occurring aquatic macrophytes[J]. Bioresource technology,2008,99:930-936.
- [15] 刘孝敏,赵运林,唐瑞锐. 重金属复合污染植物修复的研究进展[J]. 贵州农业科学,2011,39(10):214-218.
- [16] 郑振华,周培疆,吴振斌. 复合污染研究的新进展[J]. 应用生态学报,2001,12(3):469-473.
- [17] 游植麟. 土壤受镉铬铅复合污染了生物效应研究[J]. 农业环境保护,1997,16(3):131-132.
- [18] 任安芝,高玉葆. 铅、镉、铬单一和复合污染对青菜种子萌发的生物学效应[J]. 生态学杂志,2000,19(1):19-22.
- [19] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.