

# 供钾水平对空心莲子草富集 3 种重金属能力的影响

## Effect of Potassium Supply Level on Three Heavy-metal Accumulation in *Alternanthera philoxeroides*

宋志忠, 钟小仙\*

SONG Zhi-zhong, ZHONG Xiao-xian

(江苏省农业科学院畜牧研究所, 江苏南京 210014)

(Institute of Animal Science, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing, Jiangsu, 210014, China)

**摘要:**以空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)作为研究材料,通过模拟富营养化水体实验,研究空心莲子草在消减重金属污染方面的能力;同时通过供应足量钾离子,进一步揭示空心莲子草植株钾离子水平与重金属富集能力及抗逆之间的关系。研究表明,空心莲子草对重金属元素  $Mn^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  及  $Cd^{2+}$  有较好的富集能力,主要在地上部积累;空心莲子草对这 3 种重金属元素的敏感程度为  $Cd^{2+} > Pb^{2+} > Mn^{2+}$ ;在低浓度(1mM)  $K^+$  供应下,高浓度(500  $\mu M$ )的  $Mn^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  及  $Cd^{2+}$  处理明显抑制空心莲子草的生长( $Mn^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  抑制作用主要发生在根系,  $Cd^{2+}$  抑制植物整株),与对照相比,生物干重分别降低 8.7%、22.6%与 74%,提高  $K^+$  浓度(10mM)可显著缓解这 3 种重金属对植株生长的抑制,生物干重分别有效提高 22.2%、39.3%与 90.7%;此外,提高  $K^+$  浓度(10mM)可显著提升植株对这 3 种重金属的耐受力 and 富集能力,整株水平上富集量分别提高 23%、19%及 30%。

**关键词:**空心莲子草 富钾水平 重金属富集 植物修复

中图分类号:X173 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2013)01-0066-05

**Abstract:** (*Alternanthera philoxeroides*) is well known for its potassium ( $K^+$ )-enriching capabilities and its strong resistance to undesired growth conditions. The close correlations between  $K^+$ -enriching level and heavy metal accumulation was evaluated via nutrient solution culture examinations. The results revealed that *A. philoxeroides* possessed the capacity to enrich 3-metal cations of  $Mn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$ , which were mainly accumulated in the shoots. The sensitivity of *A. philoxeroides* to these 3 heavy metals was followed as  $Cd^{2+} > Pb^{2+} > Mn^{2+}$ . Based on 1 mM  $K^+$  conditions, 500  $\mu M$  heavy-metal treatment significantly inhibited the growth of *A. philoxeroides* plants (the suppression induced by  $Mn^{2+}$ , or  $Pb^{2+}$  mainly occurred in roots, and  $Cd^{2+}$  in the whole plant level). Compared to the control conditions, 500  $\mu M$   $Mn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  treatment caused decrease in dry weight of 8.7%, 22.6% and 74%, respectively. However, high external  $K^+$  (10 mM) well alleviated the depressed symptoms, which resulted in the increase in dry weight of 22.2%, 39.3% and 90.7%, respectively, associated with the increment in these 3 heavy-metal content of 23%, 19% and 30%.

**Key words:** *Alternanthera philoxeroides*, potassium enriching level, heavy metal accumulation, phytoremediation

随着采矿业的过度发展和工业废水的不当排放,水体重金属污染现象日益严重。污水中金属元素具

有危害性大、不可降解等特点,水生高等植物对重金属等污染物有较好的富集能力,可有效从废水中吸收重金属离子,既能够净化水质,还能够对一些回收的贵金属进行再利用。因此,利用水生植物富集和消减水体重金属污染是一个值得关注的研究方向。关于利用水生植物富集重金属污染物的研究,近 20 年来有了相关报道。Thaer 等<sup>[1]</sup>发现水生植物对受污染河水中的 Mn 和 Zn 具有较高的富集能力;Zayed

收稿日期:2012-07-05

收稿日期:2012-10-15

作者简介:宋志忠(1983-),男,博士,主要从事植物生理及分子生物学研究。

\* 通讯作者:钟小仙(1968-),女,博士,研究员,主要从事牧草分子育种研究。E-mail:zhpansy@yahoo.com.cn.

等<sup>[2]</sup>研究浮萍积累废水中微量元素的结果表明,浮萍是 Cd、Se 和 Cu 的良好累积物,是 Cr 的中等累积物;Hansen 等<sup>[3]</sup>利用兔脚草、猫尾草、盐水沼泽菴草属等植物净化含硒(Se)石油炼制废水,Se 的除去率可达 89%;余国营等<sup>[4]</sup>发现空心莲子草对 Na、Cu、Mg、Fe 吸收富集能力较强;顾超等<sup>[5]</sup>的研究表明空心莲子草对 Zn、Pb 的富集效果较好,用于中、轻度铅锌污染土壤的修复治理时效效果较为理想。

空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 又名革命草、喜旱莲子草、水花生,是苋科 (Amaranthaceae) 莲子草属 (*Alternanthera*) 多年生宿根草本植物。空心莲子草生物量大、繁殖快、抗逆性及适应能力强,在水田、湿地、旱地中均可生长,有很强的钾和重金属富集能力。空心莲子草是一种优秀的富钾植物。彭克勤<sup>[6]</sup>、宋志忠<sup>[7]</sup> 等通过离子消耗技术测定空心莲子草的钾离子吸收动力学参数,结果发现随着苗龄增长  $K_m$  (米氏常数) 值升高,而且其  $K_m$  值小于玉米、大麦、大豆和高粱,说明空心莲子草对钾的亲合力比普通的粮食作物高,在外界极低的钾离子浓度 ( $0.2 \mu\text{M}$ ) 下即可以有效地富集钾离子。谢少平等<sup>[8,9]</sup> 通过根和叶的钾离子吸收和通量分析,证明空心莲子草根系具有一个高效率的钾离子吸收机制,其根部向地上部转运钾离子的能力远大于大豆和向日葵。据测定,空心莲子草风干物含钾(以氧化钾计) 8.3%,是一般绿肥的 2~4 倍,因而可以作为生物钾肥替代一部分矿质钾肥<sup>[10]</sup>。另外,空心莲子草是一种具有环境修复潜力的植物,对污水中 N、P 和 Cl 等有较好的净化效果,也能有效降低 COD,对悬浮物也有一定去除效果<sup>[11~14]</sup>;水培实验显示,空心莲子草对 Hg、Cd、Pb、Cr、Cu 和 Zn 6 种重金属有较强的适应性,对 Mn、Cu 和 Zn 有一定的富集能力<sup>[7,15]</sup>。因此,本文以空心莲子草作为研究材料,通过模拟富营养化水体实验,研究空心莲子草在消减重金属污染方面的能力;同时通过供应足量钾离子,进一步揭示了空心莲子草植株钾离子水平与重金属富集能力及抗逆之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料及培养

本试验所用的空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*) 于 2010 年 4 月在南京中山陵风景区琵琶湖边采集获得,在 1/4MS<sup>[16]</sup> 营养液中驯化 1 个月用于试验。剪取长势相对一致(具有同样多的茎节和叶片数)的植株材料,垂直固定在培养罐中,弱光条件下培养生根,当植株地上部和地下部生长情况接

近一致时移到新的培养罐中。

### 1.2 重金属胁迫处理

在 1/4 MS 基础培养液中,分别设置  $500 \mu\text{M MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $500 \mu\text{M Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $500 \mu\text{M CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $500 \mu\text{M Cd}(\text{NO}_3)_2$ 、 $500 \mu\text{M ZnCl}_2$  或  $500 \mu\text{M CuSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  胁迫处理,处理 7d 后进行生物干重及元素含量检测;在特制的分根培养罐中进行不同浓度的重金属胁迫处理,左侧部分根系供应 1 mM 的 KCl,右侧部分的根系供应 10 mM 的 KCl,处理 7d 后进行元素含量分析。

### 1.3 生理指标测定

各处理的样品称鲜重,在  $105^\circ\text{C}$  烘箱中杀青 30 min,  $70^\circ\text{C}$  烘干后再称重生物干重。各待测样品烘干后充分粉碎过筛(40 目),每个样品称取 0.3 g 装入高温消煮管,用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  法消煮<sup>[17]</sup>。 $\text{K}^+$  含量用火焰原子吸收法测定,活性重金属  $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  及  $\text{Cd}^{2+}$  的含量均用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 足量的钾促进空心莲子草去除活性重金属 Mn

在  $500 \mu\text{M Mn}^{2+}$  胁迫条件下,分别添加 1mM 和 10 mM 的 KCl,观察其对植物生长的影响。植物处理 7d 后进行检测的结果(图 1)显示,空心莲子草耐受  $\text{Mn}^{2+}$  胁迫的能力比较强,地上部生长情况正常,只是根部受抑制作用明显(图 1 a)。高钾(10 mM 的 KCl)能有效缓解  $\text{Mn}^{2+}$  胁迫对根部的抑制作用,分根实验中进一步证实了这一现象(图 1a)。生物干重分析结果与生长趋势类似,即高钾(10mM 的 KCl)促进空心莲子草在  $\text{Mn}^{2+}$  胁迫下积累生物量,地上部分和地下部分的生物干重比低钾(1mM 的 KCl)条件下锰胁迫处理分别增加了 19%和 30%。

元素含量分析结果表明,与对照相比, $\text{Mn}^{2+}$  胁迫条件导致植株体内  $\text{K}^+$  含量显著降低,而高钾(1mMKCl)条件则很大程度上有效抵消了  $\text{Mn}^{2+}$  对  $\text{K}^+$  富集的抑制作用,整株钾含量水平相比低钾(1mMKCl)条件下锰胁迫处理增加 34%(表 2)。此外,高钾(10mMKCl)条件则有效促进对活性重金属  $\text{Mn}^{2+}$  的富集能力,体内  $\text{Mn}^{2+}$  含量在整株水平相比低钾(1mMKCl)条件下锰胁迫处理增加 27%(表 2)。这些结果说明莲子草是很好的  $\text{Mn}^{2+}$  富集植物,供应充足的钾显著提高了植物对活性重金属  $\text{Mn}^{2+}$  的富集量。

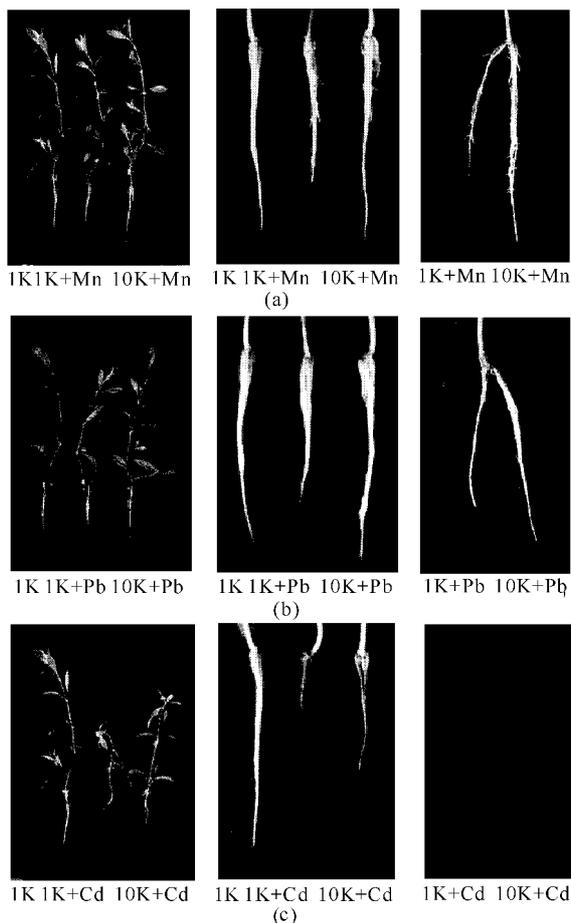


图1 重金属  $Mn^{2+}$  (a)、 $Pb^{2+}$  (b) 或  $Cd^{2+}$  (c) 胁迫条件下钾供应对植物生长的效果分析

Fig. 1 Effect analysis of enhanced  $K^+$  supply to plant growth under  $Mn^{2+}$  (a),  $Pb^{2+}$  (b) or  $Cd^{2+}$  (c) stress

1K: 1/4 MS+1 mM  $K^+$ ; 1K+Mn: 1/4 MS+1 mM  $K^+$  + 500  $\mu$ M  $MnSO_4 \cdot H_2O$ ; 10K+Mn: 1/4 MS+10 mM  $K^+$  + 500  $\mu$ M  $MnSO_4 \cdot H_2O$ ; 1K+Pb: 1/4 MS+1 mM  $K^+$  + 500  $\mu$ M  $Pb(NO_3)_2$ ; 10K+Pb: 1/4 MS+10 mM  $K^+$  + 500  $\mu$ M  $Pb(NO_3)_2$ ; 1K+Cd: 1/4 MS+1 mM  $K^+$  + 500  $\mu$ M  $Cd(NO_3)_2$ ; 10K+Cd: 1/4 MS+10 mM  $K^+$  + 500  $\mu$ M  $Cd(NO_3)_2$ .

## 2.2 足量的钾促进空心莲子草去除活性重金属 Pb

与正常情况相比,空心莲子草耐受  $Pb^{2+}$  胁迫能力较强,地上部和根部的生长情况均受抑制,根部受

表1 不同处理植株的生物量\*

K <sup>+</sup> +重金属 (mM)	干重 Dry weight (g)			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	合计 Total
CK(1.0 K <sup>+</sup> )	0.248±0.0213	0.354±0.0282	0.0483±0.00554	0.650±0.071
1.0+0.5 Mn <sup>2+</sup>	0.227±0.0271	0.329±0.0291	0.0371±0.0321	0.593±0.021
10.0+0.5 Mn <sup>2+</sup>	0.259±0.0341	0.413±0.021	0.0532±0.0512	0.725±0.021
1.0+0.5 Pb <sup>2+</sup>	0.187±0.0173	0.279±0.0292	0.0371±0.00414	0.503±0.021
10.0+0.5 Pb <sup>2+</sup>	0.248±0.0343	0.372±0.0351	0.0517±0.00621	0.671±0.021
1.0+0.5 Cd <sup>2+</sup>	0.0776±0.013	0.0800±0.0162	0.00558±0.00114	0.163±0.021
10.0+0.5 Cd <sup>2+</sup>	0.178±0.0163	0.115±0.0124	0.0183±0.00246	0.311±0.021

\* 表中数据为平均值±标准误,植物同一部位不同系列处理在  $0.01 < P < 0.05$  水平进行  $t$ -test 显著性分析。植物处理 7 天后进行检测。

Data were presented as means±SE. Different letters indicated significance at  $0.01 < P < 0.05$  by  $t$ -test from results of array stresses to the same plant organ. Seedlings were treated for 7 days before examination.

抑制作用更明显,而高钾(10 mM KCl)能有效缓解  $Pb^{2+}$  胁迫对根部的抑制作用,分根实验中进一步体现了这一现象(图 1b)。 $Pb^{2+}$  胁迫抑制植物生物干重的积累,而高钾(10 mM KCl)促进空心莲子草在  $Pb^{2+}$  胁迫下积累生物量,地上部和地下部的生物干重相比低钾(1 mM KCl)条件下锰胁迫处理分别增加 12% 和 33%。

元素含量分析结果表明,与对照相比, $Pb^{2+}$  胁迫条件导致植株体内  $K^+$  含量显著降低,而高钾(10 mM KCl)条件则部分抵消了对  $K^+$  富集的抑制作用,整株钾含量水平相比低钾(1 mM KCl)条件下铅胁迫处理增加 31%(表 2)。此外,高钾(10 mM KCl)条件则有效促进对活性重金属  $Pb^{2+}$  的富集能力,试验所测的各组织部位  $Pb^{2+}$  含量在相比低钾(1 mM KCl)条件下铅胁迫处理均显著上升,其中根部增加幅度最显著(约 30%,表 2)。这些结果说明空心莲子草是很好的  $Pb^{2+}$  富集植物,足量的钾显著促进植物对活性重金属  $Pb^{2+}$  的去除。

## 2.3 足量的钾促进空心莲子草去除活性重金属 Cd

空心莲子草耐受  $Cd^{2+}$  胁迫的能力较小,与正常情况相比, $Cd^{2+}$  胁迫显著抑制空心莲子的生长;高钾条件(10 mM KCl)能部分缓解  $Cd^{2+}$  胁迫对根部的抑制作用,分根实验中进一步证实了这一现象(图 1c)。 $Cd^{2+}$  胁迫导致植物在整株水平丧失了 75% 生物干重的积累,而高钾条件(10 mM KCl)部分缓解了生物干重的积累,地上部和地下部的生物干重相比低钾(1 mM KCl)条件下镉胁迫处理分别增加 26% 和 37%。

与对照相比, $Cd^{2+}$  胁迫条件导致植株体内  $K^+$  含量显著降低,而高钾(10 mM KCl)条件则部分抵消了对  $K^+$  富集的抑制作用,整株钾含量水平相比低钾(10 mM KCl)条件下镉胁迫处理增加了约 19%(表 2)。此外,高钾(10 mM KCl)条件则有效促进对活性

表 2 不同处理植株的  $K^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  含量分析\*

Table 2 Analysis of  $K^+$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$  or  $Cd^{2+}$  content under different stresses

$K^+$ + 重金属 (mM)	$K^+$ (g/kg, DW)				$Mn^{2+}$ , $Pb^{2+}$ or $Cd^{2+}$ (g/kg, DW)			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	合计 Total	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	合计 Total
CK(1.0 $K^+$ )	42.6±4.5 <sup>c</sup>	68.6±6.7 <sup>c</sup>	17.6±2.1 <sup>ab</sup>	129.8±14.3 <sup>c</sup>	—	—	—	—
1.0+0.5 $Mn^{2+}$	28.7±2.7 <sup>a</sup>	31.5±3.4 <sup>ab</sup>	19.7±2.3 <sup>ab</sup>	79.9±8.3 <sup>a</sup>	33.4±3.7 <sup>b</sup>	41.0±4.5 <sup>b</sup>	22.8±2.4 <sup>a</sup>	27.6±3.1 <sup>ab</sup>
10.0+0.5 $Mn^{2+}$	42.8±5.1 <sup>c</sup>	56.3±6.4 <sup>bc</sup>	24.9±2.9 <sup>b</sup>	99.1±11.7 <sup>b</sup>	42.7±5.1 <sup>bc</sup>	50.9±4.4 <sup>bc</sup>	29.9±3.2 <sup>a</sup>	33.9±3.7 <sup>b</sup>
1.0+0.5 $Pb^{2+}$	38.1±4.2 <sup>b</sup>	46.6±5.4 <sup>b</sup>	29.4±3.0 <sup>bc</sup>	114.1±10.3 <sup>bc</sup>	42.1±4.7 <sup>bc</sup>	54.6±5.8 <sup>bc</sup>	22.4±3.0 <sup>a</sup>	43.5±5.4 <sup>bc</sup>
10.0+0.5 $Pb^{2+}$	43.1±5.0 <sup>c</sup>	53.2±5.8 <sup>bc</sup>	38.2±3.9 <sup>c</sup>	134.5±15.1 <sup>c</sup>	52.1±5.4 <sup>c</sup>	62.2±6.8 <sup>c</sup>	31.2±3.9 <sup>a</sup>	51.7±6.3 <sup>c</sup>
1.0+0.5 $Cd^{2+}$	36.7±4.8 <sup>b</sup>	26.2±2.8 <sup>a</sup>	14.5±1.9 <sup>a</sup>	77.4±8.4 <sup>a</sup>	16.6±1.7 <sup>a</sup>	25.3±2.8 <sup>a</sup>	10.3±1.2 <sup>a</sup>	20.9±2.4 <sup>a</sup>
10.0+0.5 $Cd^{2+}$	43.4±5.0 <sup>c</sup>	34.1±3.8 <sup>ab</sup>	19.3±1.9 <sup>ab</sup>	96.8±10.6 <sup>b</sup>	26.1±3.0 <sup>ab</sup>	37.1±3.9 <sup>b</sup>	16.5±1.9 <sup>a</sup>	27.3±3.2 <sup>ab</sup>

\*表中数据为平均值±标准误,植物同一部位不同系列处理在  $0.01 < P < 0.05$  水平进行  $t$ -test 显著性分析,相同字母表示没有显著性差异,不同字母表示有显著性差异。植物处理 7d 后进行检测。Data were presented as means±SE. Different letters indicated significance at  $0.01 < P < 0.05$  by  $t$ -test from results of array stresses to the same plant organ. Seedlings were treated for 7 days before examination.

重金属  $Cd^{2+}$  的富集能力,试验所测的根茎叶等各组组织部位  $Cd^{2+}$  含量在相比低钾(10 mM KCl)条件下胁迫处理均显著上升,分别增加了 49%、27%和 36% (表 2)。这些结果说明莲子草对活性重金属  $Cd^{2+}$  有一定的富集能力,足量的钾显著增强植物对活性重金属  $Cd^{2+}$  的去除。

### 3 讨论

空心莲子草是一种常见的水生植物,经常生长在富营养化水体或重金属污染严重的水体中,对逆境有较强的适应能力。本研究通过模拟水体试验,评价了空心莲子草在消减重金属污染的能力;揭示了空心莲子草富钾与重金属污染水体修复能力之间的关系,尤其是提高供钾水平对修复能力的促进效果。

通过一系列的重金属胁迫处理及不同水平  $K^+$  在缓解重金属对植物生长影响及促进活性重金属元素富集能力的作用研究,我们可以知道空心莲子草对  $Mn^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  等重金属污染有较强的耐受能力,植物生长受影响的程度较小,而且对这 2 种活性重金属的富集能力很强,外界足量的钾更有效的增强了空心莲子草植物对活性重金属  $Mn^{2+}$  和  $Pb^{2+}$  的去除能力。尽管空心莲子草对重金属  $Cd^{2+}$  胁迫的耐受能力较低,植物生长严重受抑制,但是对这种活性重金属元素依然有不错的富集能力,而且外界足量的钾亦有效的增强其对活性重金属  $Cd^{2+}$  及  $Cu^{2+}$  的去除能力。此外,从整株水平分析,空心莲子草对以上 3 种重金属的富集情况(表 2),与低钾(1 mM KCl)供应相比,高钾(10 mM KCl)供应有效促进了植物对  $Mn^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  及  $Cd^{2+}$  的富集能力;在植物全株水平,空心莲子草对这几种活性重金属的富集程度分别提高了

23%、19%和 30%。由此可见,空心莲子草是一种优秀的活性重金属富集材料,有应用于重金属污染水体的理想前景。

而空心莲子草本身即是一种非常优秀的富钾植物,对钾离子有较强的亲和能力,在外界极低的钾离子浓度(0.2  $\mu$ M)下即可以有效地富集钾离子。空心莲子草根系具有一个较高效率的钾离子吸收机制,其根部向地上部转运钾离子的能力<sup>[6,7]</sup>,它的这种天然的强富钾能力将为其在重金属污染修复中提供了重要保障。因此,空心莲子草有望作为一种新型的重金属污染生物修复材料用于污染水体修复的机理研究。

#### 参考文献:

- [1] Thayer L K. Heavy metals in water, suspended particles, sediments, and aquatic plants of the upper region of Euphrates river[J]. J Environ Sci Health (Iraq), 1997, 32:2497-2506.
- [2] Zayed A. Phyto accumulation of trace elements by wetland plants: 1. Duckweed[J]. J Environ Qual, 1998, 27: 715-720.
- [3] Hansen D. Selenium removal by constructed wetland: role of biological volatilization[J]. Environ Sci Technol, 1998, 32:591-597.
- [4] 余国营, 张晓华, 梁小民, 等. 滇池水植物系统金属元素的分布特征和相关性研究[J]. 水生生物学报, 2000, 24(2):172-176.
- [5] 顾超, 李蕾, 何池全. 喜旱莲子草及鸭趾草对重金属的富集实验研究[J]. 上海大学学报:自然科学版, 2004, 10(6):626-629.
- [6] 彭克勤, 胡笃敬. 空心莲子草  $K^+$  吸收的动力学研究[J]. 植物生理学报, 1986, 12(2):187-193.
- [7] 宋志忠, 王莉, 金曼, 等. 重金属胁迫条件下空心莲子草

- 的生长和营养特制分析[J]. 基因组学与应用生物学, 2011, 30(5):614-619.
- [8] 谢少平,倪晋山. 空心莲子草、大豆和向日葵根部  $K^+$  ( $Rb^+$ ) 的吸收和通量分析[J]. 植物生理学报, 1987, 13(4):410-417.
- [9] Song Z Z, Su Y H. Distinguishing the potassium enrichment capability of *Alternanthera philoxeroides* associated with high-affinity potassium transport through KUP systems[EB/OL]. Weed Science (In-Press), doi: <http://dx.doi.org/10.1614/WS-D-12-00100.1>
- [10] 陈斌,吉训凤,季应明,等. 沅制水花生作麦稻基肥的效应研究[J]. 土壤通报, 2000, 31(4):180-182.
- [11] 庞金华,沈瑞芝,程平宏. 三种植物对 COD 的耐受极限与净化效果[J]. 农业环境保护, 1997, 16(5):209-213.
- [12] 白峰青,郑丙辉,田自强. 水生植物在水污染控制中的生态效应[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(4):99-101.
- [13] 朱慧,吴双桃. 空心莲子草在污染治理中的应用[J]. 河北化工, 2006, 29(6):55-57.
- [14] 李裕红,袁建军,陈怀宇,等. 泉州湾若干海岸植物铜、锌、铅及氮、磷、钾元素分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4):630-634.
- [15] 颜素珠,梁东,彭秀娟. 8 种水生植物对污水中重金属:铜的抗性及其净化能力的探讨[J]. 中国环境科学, 1990, 10(3):166-170.
- [16] Murashige T, Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures[J]. Physiol Plant, 1962, 15(3):473-497.
- [17] 卢如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000:191-196.

(责任编辑:邓大玉)

(上接第 59 页 Continue from page 59)

- [8] 胡贤德,孙成波,李镇泉,等. 北部湾墨吉明对虾和斑节对虾形态性状对体质量的影响分析[J]. 海南大学学报:自然科学版, 2009, 27(1):48-53.
- [9] 耿绪云,王雪惠,孙金生,等. 中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 一龄幼蟹外部形态性状对体重的影响效果分析[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(1):49-54.
- [10] 高保全,刘萍,李健. 三疣梭子蟹形态性状对体重影响的分析[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(1):44-50.
- [11] 刘磊,李健,高保全,等. 三疣梭子蟹不同日龄生长性状相关性及其对体重的影响[J]. 水产学报, 2009, 33(6):964-971.
- [12] Falconer D S, Mackay T F C. Introduction to quantitative Genetics (4th ed) [M]. Addison Wesley Longman Limited, 1996, UK:223-245.
- [13] 张琪,丛鹏,彭励. 通径分析在 Excel 和 SPSS 中的实现[J]. 农业网络信息, 2007(3):109-111.
- [14] 唐小林,沈琪,胡超群,等. 拟穴青蟹卵巢早期发育的组织学观察[J]. 海洋湖沼通报, 2009(3):72-78.
- [15] 宋春妮,李健,刘萍,等. 日本蟳形态性状对体重的影响效果[J]. 大连海洋大学学报, 2010, 25(4):365-369.

(责任编辑:邓大玉)