

植物激素-螯合剂复合处理对红苋菜富集能力的影响

郭梦露 (菏泽学院生命科学系, 山东菏泽 274015)

摘要 [目的] 探寻一种高效的土壤污染植物修复技术。[方法] 采用植物激素(IAA、GA₃、SA)和螯合剂(EDTA)复合处理分别进行叶面喷施和土壤浇灌, 研究其对红苋菜修复效率的影响。[结果] 复合处理可增加红苋菜在¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd胁迫下的生物量, 对于¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的吸收量、转移系数和富集系数, 土壤浇灌相比于叶面喷施显著提高了¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd在红苋菜植株内的富集; 3种激素和螯合剂的复合处理效果从好到差依次为100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA。[结论] 土壤浇灌100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA为最适宜处理, 使单株红苋菜对¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的富集总量达到最大。

关键词 ¹³³Cs; ⁸⁸Sr; Cd; 植物激素; 螯合剂; 植物修复

中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)01-0079-04

The Effect of Combined Treatments of Phytohormones and Chelating Agents on the Accumulation Capacity in Amaranth

GUO Meng-lu (Department of Life Sciences, Heze University, Heze, Shandong 274015)

Abstract [Objective] To discuss a high efficient phytoremediation technology for soil pollution. [Method] By using combined treatments of phytohormones(IAA, GA₃, SA) and chelating agents(EDTA), foliage application and root irrigation were carried out to study the influence on amaranth repair efficiency. [Result] The combined treatment increased biomass of amaranth under ¹³³Cs, ⁸⁸Sr, Cd stress. The ¹³³Cs, ⁸⁸Sr, Cd enrichment in amaranth by root irrigation were obviously higher than that by foliage application; The phytoextraction efficiency of phytohormones and chelating agents from best to poor was as following: 100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA, 500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA, 100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA. [Conclusion] Under the treatment of 100 mg/L SA and 1.5 mg/kg EDTA by soil irrigation, the total absorption dose of ¹³³Cs, ⁸⁸Sr, Cd per plant can achieve the maximum value.

Key words ¹³³Cs; ⁸⁸Sr; Cd; Phytohormones; Chelating agent; Phytoremediation

生物修复、物理修复、化学修复及其联合修复是污染土壤的主要修复技术, 植物修复技术是筛选和培育对目标污染物具有超常富集能力的植物, 将其种植在被污染的土壤上, 伴随植物体自身吸收水分和养分的过程将污染物吸收富集在体内, 以期达到清除污染物的目的^[1], 是一项高效、经济处理重金属及放射性污染物的新方法。目前, 提高植物修复效率的方式主要有加强施肥、添加螯合剂、改善栽培条件、利用根际微生物等。近年来, 国内外学者开始研究植物激素和螯合剂共同作用来提高植物的修复效率, 众多研究结果表明, 植物激素能缓解重金属-螯合剂的植物毒性, 提高植物生物量, 促进植物的生长发育, 螯合剂能协同促进植物对重金属的吸收、转运和积累, 显著提高植物的提取效率^[2]。Israr等^[3]以生长在富含铅土壤中的田菁为试验材料, 向植株分别喷酒萘乙酸(NAA)、生长素(IAA)后与乙二胺四乙酸(EDTA)分别进行复合处理, 结果表明, 芽的含铅量分别为对照的13.52、13.49倍。López等^[4]研究表明, 生长素的添加能显著提高植物修复效率, IAA能提高植物叶片中的铅浓度, 生长素与EDTA复合处理叶片中铅浓度是CK的28.00倍, 是EDTA单一处理的6.00倍。目前, 植物激素已广泛应用于农业生产中, 其通过调节作用改变植物对外界营养物质和水分的需求; 螯合剂能够提高土壤中重金属的溶解度, 将有机物从金属离子中解吸出来, 从而促进重金属、核素从根系向其他部位的转运。周建民等^[5]以玉米为试材, 研究了螯合剂和吡啶乙酸联合对缓解重金属胁迫的作用, 结果表明, 联合处理能明显提高玉米地上部Cd、Cu、Zn、Pb的累积量。

红苋菜(*Amaranthus mangostanus* L.) 又称青苋、野刺苋、苋菜等, 是苋科苋属一年生草本植物, 分布于我国和印度, 其根系发达, 适应力强, 为富钾植物。研究表明, 红苋菜的生物量较大, 富集核素能力强, 适应鲁西南地区生长, 是¹³³Cs、⁸⁸Sr超富集植物。笔者采用植物激素与螯合剂复合处理超富集植物红苋菜, 研究污染土壤的植物修复效率, 旨在为土壤重金属污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验地点为菏泽学院。气候属于暖温带季风大陆性气候, 年平均降水量690 mm, 平均气温14.7℃。

1.2 试验材料 供试植物为红苋菜。试验试剂:¹³³Cs的施加形式为CsCl, ⁸⁸Sr的施加形式为Sr(NO₃)₂, Cd的施加形式为Cd(NO₃)₂·4H₂O; EDTA、IAA、赤霉素(GA₃)、水杨酸(SA), 均为化学分析纯试剂。

1.3 试验设计 试验采用盆栽方式, 2015年3月18日播种红苋菜, 大田育苗, 4月19日待红苋菜长出4~6片子叶后移苗, 每盆3株。将红苋菜苗分别定植于20 mg/kg ¹³³Cs、20 mg/kg ⁸⁸Sr、20 mg/kg Cd处理的土壤中, 继续培育30 d。5月19日进行植物激素与螯合剂的复合处理。复合处理的施用方式分为叶面喷施和根系浇灌2种, 3种激素IAA、GA₃、SA的添加浓度分别为100、500、100 mg/L, 与1.5 mg/kg EDTA分别配成7种不同浓度的水溶液。其中, 以施用清水为对照处理(表1)。每处理重复3次, 共设21组。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 红苋菜生长指标的测定。 6月11日收获红苋菜, 用去离子水洗净, 沥干水分, 将根、茎、叶分开, 于105℃杀青30 min, 70℃下烘至恒重(约48 h), 分别称量干重。红苋菜的根、茎、叶部生物量利用天平直接称取, 株高和主根长、根

基金项目 国防科工局国防基础科研计划(b312011)。

作者简介 郭梦露(1987—), 女, 蒙古族, 内蒙古科尔沁人, 助教, 硕士, 从事植物修复研究。

收稿日期 2016-11-16

茎粗利用卷尺和游标卡尺测量。

表1 植物激素与螯合剂复合处理配方

Table 1 The formula of compound treatment of phytohormones and chelating agents

施用方式 Application manner	处理 Treatment	配方 Formula
叶面喷施 Foliage application	CK	0
	PIAA	100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA
	PGA	500 mg/L GA ₃ + 1.5 mg/kg EDTA
	PSA	100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA
根系浇灌 Root irrigation	JIAA	100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA
	JGA	500 mg/L GA ₃ + 1.5 mg/kg EDTA
	JSA	100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA

1.4.2 ¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd 含量的测定。将烘干的植物样品研磨后,准确称取 0.2 g 样品置于三角瓶中,加入 10 mL 混合酸(硝酸:高氯酸体积比3:1),加盖过夜。样品液倒入凯式烧瓶中,在电炉上消解,直至冒白烟,消化液呈无色透明。用

0.5 mol/L 硝酸定容至 100 mL。采用火焰原子吸收光谱法测定植物样品中⁸⁸Sr 和¹³³Cs 含量,测试仪器为美国 PE 公司 AA700 火焰原子吸收光谱仪。

1.5 数据统计 采用 Microsoft Excel 2003 软件进行数据处理,采用 DPSv 7.05 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)及在 0.05 水平下进行 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 复合处理对红苋菜生长的影响

2.1.1 对红苋菜生物量的影响。由表 2 可知,复合处理可增加红苋菜根、茎、叶地上部及单株的生物量;根系浇灌方式下红苋菜各部分生物量大于叶面喷施方式。叶部的生物量高于茎部、根部。JSA 处理根部生物量为 CK 的 4.48 倍;JGA 处理茎、叶部的生物量达到最大,分别高于 CK 289.06%、315.28%。JGA 处理下,地上部、单株生物量达到最高值,高于 CK 304.83%、306.85%。可见,根系浇灌下,500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA 处理红苋菜植株的生物量最大。

表2 植物激素与螯合剂复合处理对红苋菜生物量的影响

Table 2 The effect of biomass of amaranth plants under combined treatments of phytohormones and chelating agents

施用方式 Application manner	处理 Treatment	根部生物量 The biomass of roots	茎部生物量 The biomass of stems	叶部生物量 The biomass of leaves	地上部生物量 The biomass of above-ground	单株生物量 The biomass per plant
	CK	0.102 Ff	0.256 Ff	0.386 Gg	0.642 Gg	0.744 Gg
叶面喷施 Foliage application	PIAA	0.294 Ee	0.668 Ee	1.121 Ff	1.789 Ff	2.083 Ff
	PGA	0.413 Dd	0.987 Bb	1.514 Bb	2.501 Bb	2.914 Bb
	PSA	0.446 Bb	0.883 Cc	1.376 Dd	2.259 Dd	2.705 Dd
根系浇灌 Root irrigation	JIAA	0.299 Ee	0.673 Dd	1.212 Ee	1.885 Ee	2.184 Ee
	JGA	0.428 Cc	0.996 Aa	1.603 Aa	2.599 Aa	3.027 Aa
	JSA	0.457 Aa	0.887 Cc	1.487 Cc	2.374 Cc	2.831 Cc

注:同列不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著;同列不同大写字母表示各处理在 0.01 水平差异极显著

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences at 0.05 level; different capital letters indicate extremely significant differences at 0.01 level

2.1.2 对红苋菜农艺性状的影响。由表 3 可知,复合处理红苋菜的株高、茎粗、主根长与 CK 差异极显著。各处理中,以 JIAA 处理的主根长最大,为 CK 的 4.95 倍;最大株高、茎粗均出现在 JGA 处理,分别高于 CK 65.17%、82.55%。复合处理中,PGA 处理的主根长最小;PIAA、JIAA 处理的株高、茎粗最小,分别仅为 CK 的 1.43、1.51 倍和 1.45、1.58 倍。各复

表3 植物激素与螯合剂复合处理对红苋菜农艺性状的影响

Table 3 The effect of combined treatments of phytohormones and chelating agents on the agronomic traits of amaranth plants

施用方式 Application manner	处理 Treatment	株高 Plant length cm	茎粗 Stem diameter mm	主根长 Root length cm
	CK	14.68 Ff	1.22 Ff	1.24 Gg
叶面喷施 Foliage application	PIAA	21.04 Ee	1.84 Ee	5.92 Ff
	PGA	27.28 Dd	2.93 Bb	4.14 Bb
	PSA	24.26 Bb	2.65 Cc	5.82 Dd
根系浇灌 Root irrigation	JIAA	21.22 Ee	1.93 Dd	6.14 Ee
	JGA	28.14 Cc	3.13 Aa	4.36 Aa
	JSA	25.16 Aa	2.82 Cc	6.12 Cc

注:同列不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著;同列不同大写字母表示各处理在 0.01 水平差异极显著

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences at 0.05 level; different capital letters indicate extremely significant differences at 0.01 level

合处理对主根长处理的影响从大到小依次为 100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA,对株高、茎粗的影响从大到小依次为 500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA。

2.2 复合处理对红苋菜富集¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd 的影响

2.2.1 对积累¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd 的影响。从图 1 可以看出,各处理根、茎、叶部 Cd 含量从大到小依次为 500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA、CK,叶面喷施方式的修复效率小于根系浇灌方式,叶部的 Cd 含量显著高于根、茎部($P < 0.05$)。IAA + 1.5 mg/kg EDTA 处理根、茎、叶部 Cd 含量最小,分别为 CK 的 1.39、1.85、1.18 倍。500 mg/L GA + 1.5 mg/kg EDTA 处理下,根、茎、叶部的 Cd 含量最大,分别高于 CK 85.13%、184.62%、23.37%。

从图 2、3 可以看出,各处理红苋菜各部位对¹³³Cs、⁸⁸Sr 的吸收能力不同 Cs、Sr 从大到小依次为 100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA、CK,根系浇灌处理的修复效率大于叶面喷施方式。不同复合处理红苋菜各部位

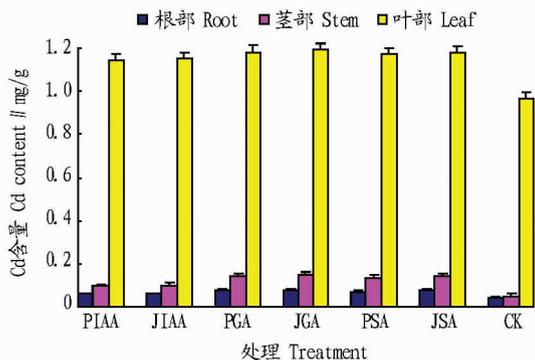


图1 植物激素与螯合剂复合处理下红苋菜各部位对Cd的吸收量

Fig. 1 The Cd content of various organs of amaranth plants under combined treatments of phytohormones and chelating agents

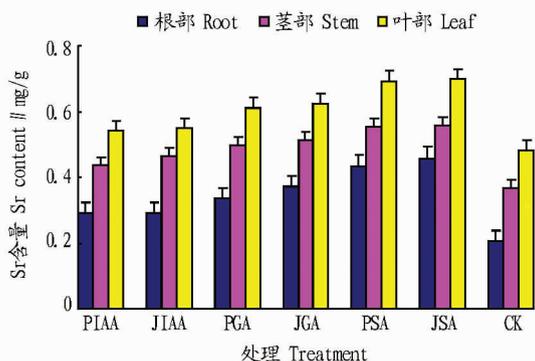


图2 植物激素与螯合剂复合处理下红苋菜各部位对⁸⁸Sr的吸收量

Fig. 2 The ⁸⁸Sr content of various organs of amaranth plants under combined treatments of phytohormones and chelating agents

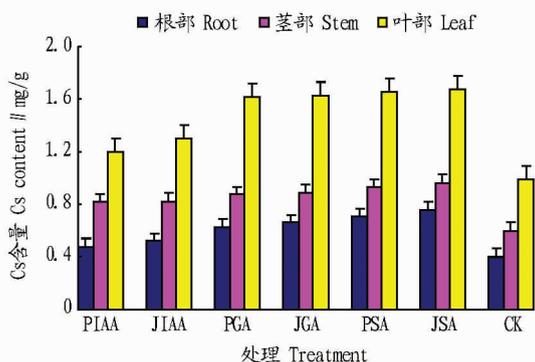


图3 植物激素与螯合剂复合处理下红苋菜各部位对¹³³Cs的吸收量

Fig. 3 The ¹³³Cs content of various organs of amaranth plants under combined treatments of phytohormones and chelating agents

¹³³Cs、⁸⁸Sr含量均显著高于CK($P < 0.05$),各部位对¹³³Cs的吸收量显著高于⁸⁸Sr($P < 0.05$)。100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA处理苋菜的根、茎、叶对¹³³Cs、⁸⁸Sr的吸收量最小,100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA处理根、茎、叶对¹³³Cs、⁸⁸Sr的吸收量最大,各部位对¹³³Cs的最大吸收量分别为0.761、

0.966、1.675 mg/g,分别为CK的1.87、1.65、1.69倍。

2.2.2 对转运¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的影响。由表4可知,复合处理红苋菜地上部¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的转运系数大于CK,根系浇灌方式相比于叶面喷施方式可提高转运水平。JGA处理的Cd转运系数和¹³³Cs转运系数最大。100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA处理下,地上部对Cd、¹³³Cs、⁸⁸Sr的转运系数均为最小。JSA处理⁸⁸Sr转运系数最大,较CK高出64.21%。可见,100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA处理下,红苋菜地上部转运Cd、¹³³Cs、⁸⁸Sr的能力最低,500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA复合处理下,地上部对Cd的转运系数最大,而100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA复合处理地上部对⁸⁸Sr的转运系数达最大。

表4 植物激素与螯合剂复合处理下红苋菜地上部对¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的转运系数

Table 4 The ¹³³Cs, ⁸⁸Sr, Cd translocation factors of above-ground of amaranth plants under combined treatments of phytohormones and chelating agents

施用方式 Application manner	处理 Treatment	Cd 转运系数 Cd translocation factor	¹³³ Cs 转运系数 ¹³³ Cs Translocation factor	⁸⁸ Sr 转运系数 ⁸⁸ Sr Translocation factor
	CK	16.45 Gg	3.32 Ee	2.71 Ff
叶面喷施 Foliage application	PIAA	21.88 Ff	4.42 Dd	3.53 Ee
	PGA	27.13 Bb	4.93 Bb	3.72 Dd
	PSA	24.51 Dd	4.93 Bb	4.16 Bb
根系浇灌 Root irrigation	JIAA	22.67 Ee	4.49 Cc	3.60 Ee
	JGA	27.81 Aa	5.15 Aa	3.97 Cc
	JSA	25.13 Cc	5.12 Aa	4.45 Aa

注:同列不同小写字母表示各处理在0.05水平差异显著;同列不同大写字母表示各处理在0.01水平差异极显著

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences at 0.05 level; different capital letters indicate extremely significant differences at 0.01 level

2.2.3 对富集¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的影响。由表5可知,复合处理¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的富集系数均大于CK,根系浇灌方式相比于叶面喷施激素极显著提高了各部分转运¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd的能力。100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA复合处理下,地上部转运Cd的能力最低,而500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA复合处理下,地上部富集系数最高,说明地上部对Cd转运的能力最大。从¹³³Cs、⁸⁸Sr富集系数来看,3种复合处理从大到小依次为100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA、CK;红苋菜地上部对¹³³Cs、⁸⁸Sr的富集系数显著高于根部,PIAA处理的富集系数最小,与CK差异极显著,分别为CK的1.11、1.24倍,而JSA处理的富集系数最大。

3 结论与讨论

(1)该研究表明,植物激素与螯合剂复合处理可增加红苋菜根、茎、叶部的生物量,能提高红苋菜的株高、主根长、茎粗,根系浇灌方式相比于叶面喷施方式更有利于红苋菜的生长,复合处理对红苋菜总生物量的促进作用从大到小依次为500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA。

表 5 植物激素与螯合剂复合处理下红苋菜对¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd 的富集系数Table 5 The ¹³³Cs, ⁸⁸Sr, Cd bioaccumulation factors of amaranth plants under combined treatments of phytohormones and chelating agents

施用方式 Application manner	处理 Treatment	⁸⁸ Sr 富集系数		¹³³ Cs 富集系数		Cd 富集系数	
		⁸⁸ Sr bioaccumulation factors		¹³³ Cs bioaccumulation factors		Cd bioaccumulation factors	
		根部 Root	地上部 Above-ground	根部 Root	地上部 Above-ground	根部 Root	地上部 Above-ground
叶面喷施 Foliage application	CK	1.32 Gg	4.09 Gg	1.92 Gg	8.19 Ff	0.21 Gg	0.68 Gg
	PIAA	1.46 Ee	4.89 Ff	2.39 Ee	10.09 Cc	0.31 Ff	1.05 Ee
	PGA	1.67 Cc	5.54 Dd	3.12 Bb	12.46 Ee	0.40 Bb	1.31 Bb
	PSA	2.17 Aa	6.24 Bb	3.56 Dd	12.96 Dd	0.37 Dd	1.26 Dd
根系浇灌 Root irrigation	JIAA	1.47 Dd	5.07 Ee	2.59 Ff	10.62 Aa	0.31 Ee	1.10 Ff
	JGA	1.86 Bb	5.69 Cc	3.31 Aa	12.59 Ff	0.41 Aa	1.34 Aa
	JSA	2.29 Dd	6.32 Aa	3.81 Cc	13.21 Bb	0.40 Cc	1.30 Cc

注:同列不同小写字母表示各处理在 0.05 水平差异显著;同列不同大写字母表示各处理在 0.01 水平差异显著

Note: Different lowercases in the same column stand for significant differences at 0.05 level; different capital letters indicate extremely significant differences at 0.01 level

(2) 激素与螯合剂复合处理对 Cd 的吸收能力从大到小依次为 500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA、CK。复合处理对红苋菜各部分¹³³Cs、⁸⁸Sr 含量从大到小依次为 100 mg/L SA + 1.5 mg/kg EDTA、500 mg/L GA₃ + 1.5 mg/kg EDTA、100 mg/L IAA + 1.5 mg/kg EDTA、CK。Shahandeh 等^[6]研究表明,添加外源柠檬酸和草酸处理向日葵和印度芥菜,其嫩枝积累量增加了 150 倍。Huang 等^[7]利用柠檬酸处理中国白菜和印度芥菜,结果表明,其地上部分对土壤中铀的吸收量显著增加,为对照铀吸收量的 1 000 倍。Chang 等^[8]在铀污染的土壤中施用柠檬酸研究植物的积累效应,结果表明,油菜根部积累铀量高达 3 500 mg/kg,印度芥菜叶部积累的铀量达 2 000 mg/kg,显著高于对照。

(3) 该研究得出,IAA、GA₃、SA 与 EDTA 的复合处理显著增加了红苋菜各部分的生物量,加快了植株的生长发育,增加了¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd 在植株体内的积累量,加大了植株各部分对¹³³Cs、⁸⁸Sr、Cd 的转运和富集。这可能是由于添加螯合剂能够活化土壤中的重金属,提高重金属的生物有效性,促进植物吸收,同时植物激素能缓解重金属-螯合剂的植物毒

性,促进植物根系伸长,增加植物生物量,协同螯合剂促进植物对重金属的吸收、转运和积累,从而显著提高植物提取效率,但有关协同强化植物修复的机理仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] 顾崑飞. 镉对黑麦草生理生化特性及矿质元素吸收的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2008; 53-55.
- [2] PANG J, CHAN G S Y, ZHANG J, et al. Physiological aspects of Vetiver grass for rehabilitation in abandoned metalliferous mine wastes[J]. Chemosphere, 2003, 52(9): 1559-1570.
- [3] ISRAR M, SAHI S V. Promising role of plant hormones in translocation of lead in *Sesbania drummondii* shoots[J]. Environ Pollut, 2008, 153(1): 29-36.
- [4] LÓPEZ M L, PERALTA-VIDEA J R, BENITEZ T, et al. Enhancement of lead uptake by alfalfa (*Medicago sativa*) using EDTA and a plant growth promoter[J]. Chemosphere, 2005, 61(4): 595-598.
- [5] 周建民, 党志, 陶雪琴, 等. NTA 对玉米体内 Cu、Zn 的积累及亚细胞分布的影响[J]. 环境科学, 2005, 26(6): 126-130.
- [6] SHAHANDEH H, HOSSNER I R. Enhancement of uranium phytoaccumulation from contaminated soils[J]. Soil science, 2002, 167(4): 269-280.
- [7] HUANG J W, CHEN J J, BERTI W R, et al. Phytoremediation of lead-contaminated soils; Role of synthetic chelates in lead phytoextraction[J]. Environmental science & technology, 1997, 31(3): 800-805.
- [8] CHANG P C, KIM K W, YOSHIDA S, et al. Uranium accumulation of crop plant enhanced by citric acid[J]. Environmental geochemistry and health, 2015, 27(516): 529-538.

(上接第 68 页)

- [3] 罗勇胜, 张道波, 李卓佳. 有益菌与大型藻类净化集约化养殖废水的展望[J]. 海洋湖沼通报, 2006(2): 111-116.
- [4] CHUNG I K, KANG Y H, YARISH C, et al. Application of seaweed cultivation to the bioremediation of nutrient-rich effluent[J]. Algae, 2002, 17(3): 187-194.
- [5] 汤坤贤, 焦念志, 游秀萍, 等. 菊花心江蕨在网箱养殖区的生物修复作用[J]. 中国水产科学, 2005, 12(2): 156-161.
- [6] 曲克明, 卜雪峰, 马绍赛. 贝藻处理工厂化养殖废水的研究[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(4): 36-43.
- [7] HAGLUND K, PEDERSÉN M. Outdoor pond cultivation of the subtropical marine red alga *Gracilaria tenuistipitata* in brackish water in Sweden. Growth, nutrient uptake, co-cultivation with rainbow trout and epiphyte control[J]. Journal of applied phycology, 1993, 5(3): 271-284.
- [8] TROELL M, HALLING C, NILSSON A, et al. Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cage for reduced environmental impact and increased economic output[J]. Aquaculture, 1997, 156(1): 45-61.
- [9] TROELL M, RÖNNBÄCK P, HALLING C, et al. Ecological engineering in aquaculture: Use of seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture[J]. Journal of applied phycology, 1999, 11(1): 89-97.
- [10] NELSON S G, GLENN E P, MOORE D, et al. Use of an edible red sea-

weed to improve effluent from shrimp farms[J]. Journal of phycology, 2001, 37(S3): 38.

- [11] 谭洪新, 朱学宝, 罗国芝, 等. 闭合循环养殖系统中构建藻皮净化装置的初步研究[J]. 上海水产大学学报, 2001, 10(3): 276-278.
- [12] WANG J K. Conceptual design of a microalgae-based recirculating oyster and shrimp system[J]. Aquaculture engineering, 2003, 28(1/2): 37-46.
- [13] CHUNTAPA B, POWTONGSOOK S, MENASVETA P. Water quality control using *Spirulina platensis* in shrimp culture tanks[J]. Aquaculture, 2003, 220(1): 355-366.
- [14] NEORI A, KROM M D, ELLNER S P, et al. Seaweed biofilters as regulators of water quality in integrated fish-seaweed culture units[J]. Aquaculture, 1996, 141(3/4): 183-199.
- [15] JONES A B, DENNISON W C, PRESTON N P. Integrated treatment of shrimp effluent by sedimentation, oyster filtration and macroalgal absorption: A laboratory scale study[J]. Aquaculture, 2001, 193(1/2): 155-178.
- [16] 彭建华, 陈文祥, 陈会明, 等. 综合生物塘处理养殖废水初探[J]. 水利渔业, 2004, 24(4): 60-62.
- [17] 钱金全, 蓝泽桥, 胡超, 等. 工厂化双循环水养鲟模式的研究[J]. 渔业现代化, 2006(6): 3-6.
- [18] 何玉明, 王维善, 周凤建, 等. 生态型循环水处理系统在工厂化养鱼中的应用研究[J]. 渔业现代化, 2006(5): 9-11.