

江文静, 王 丹, 姚天月. 铀及其伴生重金属镉的根茎类富集植物的筛选[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 39-47.

JIANG Wen-jing, WANG Dan, YAO Tian-yue. Screening of rhizomatic accumulators to uranium and cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 39-47.

铀及其伴生重金属镉的根茎类富集植物的筛选

江文静^{1,2}, 王 丹^{1,2*}, 姚天月^{1,2}

(1.西南科技大学生命科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2.西南科技大学核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要:为研究植物对铀(U)、镉(Cd)的富集特性,在每千克土中分别外源添加铀、镉 150 mg 和 15 mg,试验评价 5 科 8 种根茎类植物的污染耐受性和铀、镉富集转运效应,筛选富集植物,并以对铀有良好富集效果的植物向日葵作为对照,通过主成分分析对植物铀、镉富集转运能力进行综合评价。结果表明:8 种植物中,雪莲果综合评价最高,各部生物量均大于对照,单株铀积累量和铀、镉积累总量均最大,分别为 3 564.75 μg 和 4 342.95 μg ,根部铀含量为 638.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$,铀富集系数 4.26;此外,由于雪莲果有膨大的块状茎,生物量较大,存在用于植物修复的潜质。苤蓝吸收铀、镉最少,单株铀、镉含量分别低至 1.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$ 和 11.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$,贮藏部位的铀、镉含量更低,分别仅有 1.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$ 和 2.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$,故苤蓝有应用于污染土再利用的潜质。

关键词:富集植物;铀;镉

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)01-0039-09 doi:10.11654/jaes.2016-0828

Screening of rhizomatic accumulators to uranium and cadmium

JIANG Wen-jing^{1,2}, WANG Dan^{1,2*}, YAO Tian-yue^{1,2}

(1.College of Life Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2.State Defense Key Laboratory of the Nuclear Waste and Environmental Security, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: To study plants uranium (U) and cadmium (Cd) enrichment characteristics is significance. The U-Cd-contaminated soil was conducted to study the tolerance, accumulation and transformation of U and Cd using eight rhizomatic plants (Saussurea involucrata, Colocasia esculenta L., Acorus calamus L., Alocasia macrorrhiza L., Ipomoea batatas, Dioscorea Transversa, Solanum tuberosum, Brassica oleracea var. caulorapa, Helianthus annuus) under the additional 150 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{U}$, 15 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$; The sunflower worked as CK. The advantage of evaluation method was used to synthesized comment these plants. Results was showed that the roots of the implemented plants are the main parts to store the U and Cd; the translocation factor from the underground part to the storage is lower than the factor from the storage to up-ground part; the synthesized comment of Saussurea involucrata, with the best tolerance and stronger capability in extracting and accumulating U and Cd, is the highest among the eight species of plants. The U content in underground part and the bioaccumulation factor of Saussurea involucrata are up to 638.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$ and 4.26, respectively. Moreover, the single U bioaccumulation quantity and the total U and Cd bioaccumulation quantity of Saussurea involucrata are also highest up to 3 564.75 μg and 4 342.95 μg , respectively. On the contrary, the Brassica oleracea var. caulorapa perform worst in this experiment, whose U and Cd contents are down to 1.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$ and 11.45 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{DW}$, respectively. The Brassica oleracea var. caulorapa has the ability to recycle the contaminated soil.

Keywords: rhizomatic accumulator; uranium; cadmium

收稿日期:2016-06-20

作者简介:江文静(1990—),女,硕士研究生,研究方向为辐射生物效应及生物修复。E-mail:15351244142@163.com

*通信作者:王 丹 E-mail:wangdan@swust.edu.cn

基金项目:国家核设施退役及放射性废物治理科研重点项目(14ZG6101)

Project supported: The Key Program of the National Defense Science and Technology Bureau National Nuclear Facilities and Radioactive Waste Management Research(14ZG6101)

核技术的发展在给人类带来巨大利益的同时也产生了大量的核废物^[1]。放射性铀作为主要的核废物之一,常常与镉伴生存在^[2],二者会通过各种途径进入土壤环境中,并能通过食物链严重威胁人体健康。植物修复作为核素污染土壤的绿色修复方法,具有操作简单、成本低廉且不带来二次污染的特点^[3-4]。植物提取是植物修复的主要手段之一^[5],而超富集植物筛选则是植物提取的核心与基础^[6]。镉的超富集植物主要有天蓝遏蓝菜(*Thlaspi arvense* L.), 宝山堇菜(*Violabaoshaensis*), 二者在自然条件下对镉的富集量分别高达 2130、1168 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[7-8];而向日葵(*Helianthus annuus*)和印度芥菜(*Brassica juncea*)则能超量富集铀,其中向日葵对铀的富集主要集中在根部^[9],印度芥菜则可将铀大量转运至地上部^[10]。

传统的超富集植物筛选主要存在四个问题:

(1)土壤重金属浓度设置不恰当。研究发现铀浓度为 100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时^[11-12],耐性植物的耐性体现不明显,大多数植物均能正常生长;而土壤铀含量在 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上时会使非敏感植物叶色变淡萎蔫,植株变小^[13-14],植株无法正常完成其生长周期。这两种铀处理均不能准确有效地反应植物对铀的耐受性和富集特性。同时,镉作为铀重要的伴生重金属,在土壤 A 层中最大含量可达到 13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,因此选择恰当的试验浓度非常重要。

(2)参选植物主要集中在杂草和花卉之中^[15-24],其中不乏一些能超量积累重金属的种类,但这类植物普遍存在生物量较小、重金属转运难,且地下部生长状况较弱而导致无法承受过高浓度的重金属,常常在完成整个生长周期前出现枯黄、萎蔫甚至死亡等缺陷^[2]。因此杂草与花卉的总体修复效果并不明显。

(3)一般的植物幼苗时期没有多余的营养储备,完全依赖土壤营养条件,抵抗铀、镉毒害的能力较弱,这往往会导致植物幼苗发育不良,影响其后期对重金属的吸收富集。

(4)大多数植物富集铀、镉主要为地下部,而地下部不易采收,导致最后修复效果并不理想。

根茎类植物生物量大、生长耐性强,块根、块茎无性繁殖可为幼苗移栽初期提供充足营养,且地下部易于采收。本试验创新性地选取 5 科 8 种根茎类植物幼苗作为试验材料进行模拟盆栽试验,比较研究在铀、镉浓度分别为 150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土和 15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土的复合污染条件下,8 种植物的耐受性和铀、镉富集转运特性,同时选取报道中铀富集效果较好的向日葵作为

铀、镉富集效果总体评价中的参照植物。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 植物

供试植物共 9 种,分属 5 科 8 属,分别是芋头、菖蒲、雪莲、海芋、向日葵、苤蓝、马铃薯、红薯、脚板薯(表 1)。所有植物幼苗均购于绵阳市农资市场。

表 1 供试植物

Table 1 Plant species used in the study

序号 No.	种名 Plant species	学名 Formal name	科 Family	属 Genus
1	芋头	<i>Colocasia esculenta</i> L.	天南星科	芋属
2	菖蒲	<i>Acorus calamus</i> L.	天南星科	菖蒲属
3	海芋	<i>Alocasia macrorrhiza</i> L.	天南星科	海芋属
4	雪莲果	<i>Saussurea involucreata</i>	菊科	风毛菊属
5	红薯	<i>Ipomoea batatas</i>	旋花科	番薯属
6	脚板薯	<i>Dioscorea Transversa</i>	旋花科	番薯属
7	马铃薯	<i>Solanum tuberosum</i>	茄科	茄属
8	苤蓝	<i>Brassica oleracea</i>	十字花科	芸薹属
9	向日葵	<i>Helianthus annuus</i>	菊科	向日葵属

1.1.2 试剂

硝酸双氧铀[$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$]和氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)均为分析纯,购于西南科技大学生科力公司。

1.1.3 土壤

供试土壤取自西南科技大学龙山资源圃表层 0~15 cm 的土壤,土壤类型为黄壤土,基本理化性质为: pH 6.88,有机质 18.99 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷、碱解氮、速效钾分别为 41.35、166.46、57.03 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量为 119.79 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

通过向供试土壤外源施加 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 来模拟复合污染土壤。U 和 Cd 用专业搅拌器材与供试土壤均匀混合,二者浓度分别为 150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土和 15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土。一次性施入基肥: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 24.3 g; KH_2PO_4 7.02 g; K_2SO_4 24.52 g。混合均匀并保持供试土壤含水量为田间持水量的 60%,静置平衡 2 周后装盆备用。试验容器为长方体塑料花盆(长、宽、高分别为 50、15、20 cm),底部有孔,带托盘,每盆定量装土 4 kg。

静置结束后,将 9 种供试植物幼苗移栽到装好铀、镉模拟污染土壤的花盆中,5 次重复,另设置 1 组不添加铀、镉元素的空白处理,共 54 盆,每盆种 3 株

植物幼苗, 共 162 株。栽培过程中定期浇水以保持栽培盆中土壤含水量为田间持水量的 60% 左右, 并将托盘中的沥出物全部重新倒回花盆中, 待植物完成各自生长期之后收获, 进行相关指标的测定。

1.3 分析测定方法

1.3.1 生物量测定

样品采收后用蒸馏水洗净, 滤纸吸干多余水分, 将植物分为地上部、贮藏部和根部(本研究中块茎植物的根部指所有形态学根部, 块根植物的根部指除去肉质根后的所有须根系)分别装袋, 做好标记后置于烘箱中 110 °C 杀青 3 h, 然后 75 °C 烘干至恒重, 用电子天平(精度 0.001)分别测定地上部、贮藏部和地下部的干物质量。

1.3.2 铀、镉含量测定

将块茎植物分地上部、块茎、根系, 块根植物分地上部、块根、须根, 各部分单独研磨并过 100 目筛, 每个样品称取 0.1~0.5 g (实际用量视植物样品总量而定), 进行石墨炉(SH220)消解。采用 IAA(火焰原子吸收光谱仪, AA700, 美国)测定消解样品中镉含量, ICP-MS(等离子电感耦合质谱仪, Agilent 7700x, 美国安捷伦公司)测定铀含量。每个样品重复测定 3 次。

1.4 数据处理

铀镉富集能力采用 DPS 进行单因素方差分析, Origin 9.0 作图; 植物富集特性综合评价采用 IBM SPSS Statistics 22 进行主成分分析。

富集系数(Bioaccumulation factor, BCF)=植物各部铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/土壤全铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

铀积累量(Bioaccumulation quantity, BCQ, μg)=植物各部铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) $\times$ 植物对应各部干重(g)

地下部向贮藏部转运系数(Translocation factor, TF1)=植物贮藏部铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/地下部铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

贮藏部向地上部转运系数(Translocation factor, TF2)=植物地上部铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)/贮藏部铀(镉)含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

2 结果与分析

2.1 铀、镉对植物生物量的影响

从图 1A、图 1B、图 1C 可以看出, 铀、镉处理能显著促进雪莲果须根和贮藏部位块根的生长, 二者生物量分别达到对照的 1.40 倍和 2.21 倍($P<0.05$), 但对雪莲果地上部影响不明显。铀、镉处理下红薯的块根生

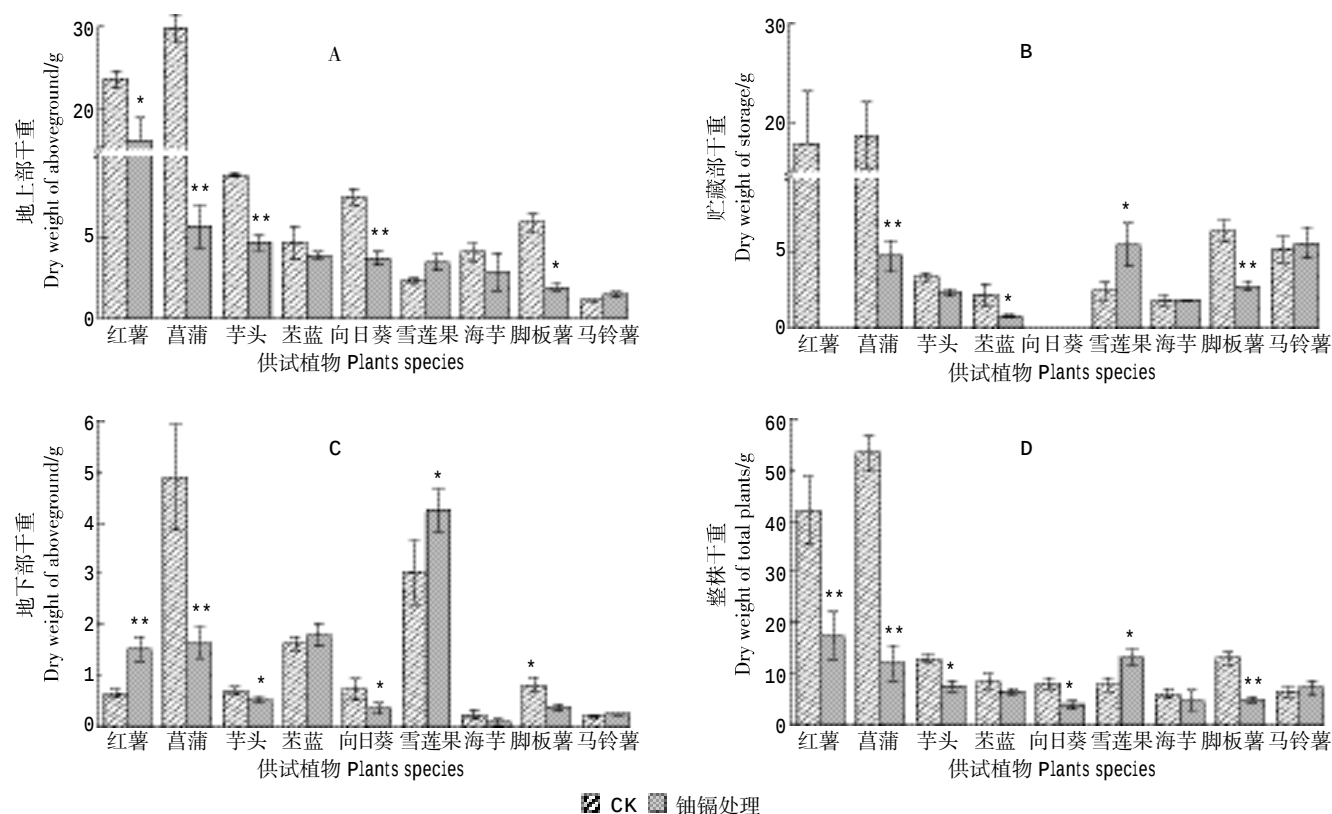


图 1 铀、镉对植物生物量的影响

Figure 1 Effects of U and Cd on plant biomass

物量几乎为零,地上生长也受到明显抑制,但须根生物量显著提高,为对照的 2.33 倍。说明铀、镉对植物不同部位生物量的影响不同。

海芋、马铃薯在铀、镉胁迫下表现出较强的耐性,生物量与对照无明显差异。而菖蒲、芋头、脚板薯、向日葵在铀、镉的胁迫下各部生长受到显著抑制,其中菖蒲所受影响最大,其各部生物量均减少了 60% 以上。由此可见,铀、镉胁迫对植物生长的影响因植物种类不同而不同。

由图 1D 可知,雪莲果单株生物量显著大于对照。虽然菖蒲、红薯的单株生物量较大,但受到的抑制最强。

2.2 植物各部铀、镉的含量和富集系数

表 2 显示 9 种植物各部铀含量大小。芋头对铀的吸收效果最好,其各部的铀含量均高于其他植物的对

应部位,芋头地下部的铀含量达到 $820.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$,为最小铀含量苤蓝地下部的 70.86 倍,二者差异显著 ($P < 0.05$)。此外,雪莲果也表现出较强的吸收铀的能力,其地下部、贮藏部和单株铀含量仅次于芋头相应部位,大小分别为 638.89 、 139.51 、 $271.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 。

镉在不同植物体内的含量如表 3 所示。菖蒲地下部镉含量最高 ($364.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$),但其地上部和贮藏部(肉质茎)的镉含量处于较低水平,均不到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$ 。芋头在铀含量已经较高的情况下,对镉的吸收量也较大,地下部镉含量仅次于菖蒲为 $337.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$,且单株镉含量最高。综上所述,雪莲果、芋头、菖蒲为本试验中吸收铀、镉的优势植物,初步具备铀、镉富集植物特性。

9 种植物对铀的富集效果见表 4。植物根部的铀富集系数均高于地上部和贮藏部,其中芋头、雪莲果地

表 2 铀、镉复合污染处理下植物各部铀含量
Table 2 U concentration in different parts under U and Cd treatments

序号 No.	植物种类 Plant species	地上部分 Aboveground parts/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	贮藏部分 Storage/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	地下部分 Underground parts/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	单株 Total/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$
1	芋头 <i>C. esculenta</i> L.	$87.722 \pm 7.658a$	$146.096 \pm 6.912a$	$820.570 \pm 12.923a$	$296.475 \pm 11.95a$
2	雪莲果 <i>S. involucrata</i>	$18.557 \pm 1.580cd$	$139.513 \pm 10.444a$	$638.891 \pm 8.070b$	$271.858 \pm 6.605a$
3	菖蒲 <i>A. calamus</i> L.	$47.951 \pm 1.584b$	$24.482 \pm 6.071b$	$456.650 \pm 13.090c$	$96.848 \pm 2.426c$
4	向日葵 <i>H. annuus</i>	$1.500 \pm 0.092e$	—	$103.393 \pm 6.633d$	$10.578 \pm 3.105ef$
5	红薯 <i>I. batatas</i>	$17.102 \pm 2.202cd$	—	$87.384 \pm 6.842d$	$23.26 \pm 0.901de$
6	脚板薯 <i>D. Transversa</i>	$38.78 \pm 2.951b$	$27.353 \pm 3.364b$	$44.422 \pm 4.852e$	$33.121 \pm 2.143d$
7	海芋 <i>A. macrorrhiza</i> L.	$38.314 \pm 3.154b$	$31.908 \pm 1.547b$	$67.082.355de$	$35.884 \pm 0.752d$
8	马铃薯 <i>S. tuberosum</i>	$3.223 \pm 0.252de$	$2.163 \pm 0.435c$	$42.776 \pm 4.726e$	$3.739 \pm 0.386f$
9	苤蓝 <i>B. oleracea</i>	$1.272 \pm 0.324f$	$1.426 \pm 0.310d$	$11.579 \pm 0.916f$	$1.452 \pm 0.490f$

注:表中数据为平均数 $\pm$ 标准差($n=3$);不同字母表示 0.05 水平上差异显著(LSD 检验);“—”表示该植物没有贮藏部或者在试验条件下贮藏部生物量为零。下同。

Note: Data in the table showed mean $\pm$ standard deviation ($n=3$); Different letters refer to significant differences at 0.05 level (LSD test); “—” there is no storage on the body of the plant. The same below.

表 3 铀、镉复合污染处理下植物各部镉含量
Table 3 Cd concentration in different parts under U and Cd treatments

序号 No.	植物种类 Plant species	地上部分 Aboveground parts/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	贮藏部分 Storage/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	地下部分 Underground parts/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$	单株 Total/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DW}$
1	芋头 <i>C. esculenta</i> L.	$64.743 \pm 3.924a$	$34.191 \pm 2.022b$	$337.449 \pm 6.824a$	$73.752 \pm 9.781a$
2	雪莲果 <i>S. involucrata</i>	$72.472 \pm 3.862a$	$95.792 \pm 2.964a$	$41.255 \pm 3.411d$	$59.721 \pm 8.763ab$
3	菖蒲 <i>A. calamus</i> L.	$3.501 \pm 0.662e$	$8.201 \pm 1.803c$	$364.047 \pm 17.436a$	$51.19 \pm 9.40b$
4	向日葵 <i>H. annuus</i>	$13.634 \pm 2.401de$	—	$1.042 \pm 0.271e$	$2.143 \pm 0.533d$
5	红薯 <i>I. batatas</i>	$42.723 \pm 4.574b$	—	$80.971 \pm 4.853c$	$46.589 \pm 2.802bc$
6	脚板薯 <i>D. Transversa</i>	$28.594 \pm 0.813c$	$37.743 \pm 3.914b$	$29.658 \pm 3.107de$	$33.726 \pm 4.067c$
7	海芋 <i>A. macrorrhiza</i> L.	$9.603 \pm 2.004de$	$7.675 \pm 1.689c$	$129.486 \pm 11.67b$	$10.280 \pm 2.401d$
8	马铃薯 <i>S. tuberosum</i>	$18.61 \pm 2.601cd$	$3.266 \pm 0.119cd$	$60.16 \pm 5.202cd$	$8.160 \pm 0.568d$
9	苤蓝 <i>B. oleracea</i>	$5.270 \pm 0.523e$	$2.432 \pm 0.982d$	$22.575 \pm 1.661de$	$11.447 \pm 0.500d$

下部的富集系数居于前两位, 分别为 5.470 和 4.259, 贮藏部位的富集系数均大于 0.9, 单株富集系数分别达到 1.043 和 1.812, 具备超富集植物富集系数大于 1 的特点。苜蓿的各部富集系数较小, 其单株铀富集系数仅为 0.071, 说明苜蓿吸收铀较为困难。由于镉的金属性质与植物必需元素锌相似且土壤中外源镉浓度较低, 大部分植物对镉的富集水平较高。分析表 5 的数据可知, 芋头的单株镉富集系数最大为 4.917, 雪莲果位居第二为 3.981。

从铀、镉含量和富集系数来看, 芋头效果最好, 苜蓿、雪莲果其次, 具备较强的铀、镉超富集潜力; 苜蓿效果最差, 不具有富集铀、镉的特性。

2.3 植物各部之间铀镉的转运情况

为了进一步分析铀、镉元素在根茎类植物各部的迁移情况, 本试验分别计算了铀、镉元素从地下部转运到贮藏部的转运系数 TF1 和从贮藏部转运到地上部的转运系数 TF2。表 6 中“R”表示 TF2 与 TF1 之比, 该比值越高说明贮藏部的铀、镉转出能力越强。分析表 6 数据可知, 马铃薯铀、镉 R 值最高, 分别达到

29.09 和 103.55, 说明马铃薯贮藏部的铀、镉转出能力远高于转入能力, 其贮藏部对铀、镉有较强的排斥作用; 而雪莲果的两个比值均小于 1, 说明雪莲果对铀、镉的转运能力较弱。

2.4 植物各部铀、镉的积累量

植物铀、镉的积累量(BCQ)可实际反映植物各部或单株铀、镉的绝对质量, 其主要受生物量和铀、镉含量两个指标影响。图 2A 表示 9 种供试植物对铀的绝对积累量。可以看出, 除地上部外雪莲果单株铀积累量均显著高于其余植物($P<0.05$), 为 3 564.75 μg 。马铃薯各部与单株铀积累量均为最低。图 2B 为各植物的镉积累量, 由图可知, 雪莲果的单株镉积累量次于红薯位居第二, 为 778.2 μg 。雪莲果铀、镉总积累量最高, 为 4 342.95 μg , 说明其对铀、镉的综合积累效果最好。

2.5 苜蓿、芋头、雪莲果铀、镉富集能力的综合评价与比较

影响植物对铀、镉元素吸收的因素很多, 且每种因素对植物吸收铀、镉综合能力的影响程度不同, 因此单个影响因子的好坏无法全面反映植物的超富集

表 4 铀、镉复合污染处理下植物各部铀富集系数
Table 4 BCF for U in different parts of plants under U and Cd treatments

序号 No.	植物种类 Plant species	地上部分 Aboveground parts	贮藏部分 Storage	地下部分 Underground parts	单株 Total
1	芋头 <i>C. esculenta</i> L.	0.585±0.151a	0.974±0.046a	5.470±0.306a	1.043±0.147b
2	雪莲果 <i>S. involucreta</i>	0.124±0.013c	0.930±0.116a	4.259±0.167b	1.812±0.111a
3	苜蓿 <i>A. calamus</i> L.	0.320±0.011b	0.190±0.040b	3.044±0.274c	0.646±0.016c
4	向日葵 <i>H. annuus</i>	0.010±0.001e	—	0.689±0.178d	0.076±0.021ef
5	红薯 <i>I. batatas</i>	0.114±0.013cd	—	0.583±0.113d	0.155±0.006de
6	脚板薯 <i>D. Transversa</i>	0.259±0.054b	0.182±0.056b	0.296±0.053e	0.221±0.027d
7	海芋 <i>A. macrorrhiza</i>	0.255±0.021b	0.213±0.011b	0.447±0.016de	0.239±0.005d
8	马铃薯 <i>S. tuberosum</i>	0.021±0.002de	0.014±0.003c	0.285±0.045e	0.025±0.003f
9	苜蓿 <i>B. oleracea</i>	0.035±0.004cde	0.016±0.008c	0.191±0.011e	0.071±0.003ef

表 5 铀、镉复合污染处理下植物各部镉富集系数
Table 5 BCF for Cd in different parts of plants under U and Cd treatments

序号 No.	植物种类 Plant species	地上部分 Aboveground parts	贮藏部分 Storage	地下部分 Underground parts	单株 Total
1	芋头 <i>C. esculenta</i> L.	4.316±1.061a	2.280±0.410b	22.497±0.921a	4.917±0.852a
2	雪莲果 <i>S. involucreta</i>	4.831±0.725a	4.608±1.933a	2.751±0.427d	3.981±0.784ab
3	苜蓿 <i>A. calamus</i> L.	0.233±0.044e	0.547±0.129c	24.270±3.829a	3.813±0.636b
4	向日葵 <i>H. annuus</i>	0.909±0.294de	—	0.070±0.018e	0.143±0.036d
5	红薯 <i>I. batatas</i>	2.848±0.505b	—	5.398±0.657c	3.093±0.453bc
6	脚板薯 <i>D. Transversa</i>	1.906±0.054c	2.516±0.564b	1.974±0.408de	2.249±0.272c
7	海芋 <i>A. macrorrhiza</i>	0.641±0.200de	0.511±0.138c	8.633±1.678b	0.742±0.133d
8	马铃薯 <i>S. tuberosum</i>	1.241±0.173cd	0.218±0.009c	4.011±0.347cd	0.844±0.038d
9	苜蓿 <i>B. oleracea</i>	0.351±0.035e	0.162±0.080c	1.905±0.112de	0.723±0.033d

表6 铀、镉复合污染处理下植物铀镉转移系数

Table 6 U and Cd TF in different parts under U and Cd treatments

序号 No.	植物种类 Plant species	铀(U)			镉(Cd)		
		TF1	TF2	R	TF1	TF2	R
1	芋头 <i>C. esculenta</i> L.	0.178±0.004b	0.597±0.125cd	3.350	0.102±0.019b	1.888±0.234bc	18.510
2	雪莲果 <i>S. involucrata</i>	0.219±0.030b	0.133±0.004d	0.607	1.633±0.413a	1.120±0.262cd	0.690
3	菖蒲 <i>A. calamus</i> L.	0.062±0.009b	1.736±0.373ab	28.00	0.022±0.006b	0.481±0.212d	21.860
4	脚板薯 <i>D. Transversa</i>	0.653±0.314a	1.541±0.713b	2.350	1.327±0.451a	0.785±0.182d	0.590
5	海芋 <i>A. macrorrhiza</i> L.	0.476±0.027a	1.206±0.154bc	2.582	0.059±0.009b	1.309±0.449cd	22.190
6	马铃薯 <i>S. tuberosum</i>	0.052±0.018b	1.513±0.207b	29.090	0.055±0.007b	5.695±0.686a	103.550
7	茼蒿 <i>B. oleracea</i>	0.085±0.041b	2.439±0.854a	28.690	0.085±0.041b	2.439±0.854b	28.690

能力。试验运用 SPSS Statistics 22 软件对 9 种植物的单株生物量、单株铀、单株镉含量、单株富集系数、地下向贮藏部的转运系数、贮藏部向地上部的转运系数、单株积累量 6 个指标进行主成分分析,提取 3 个主成分分别为:铀、镉提取能力主成分;铀、镉贮藏部向地上部转运能力主成分;贮藏部向地上部转运铀、镉能力主成分。通过各主成分贡献率计算每个主成分的权重值,再乘以其经过无量纲化处理的平均值得到表7中各植物的综合评价分数,总分为铀、镉得分的直接加和。可以明显看出 3 种优势植物分别是雪

莲果、芋头、菖蒲。这与前文中 3 种植物的吸收富集效果表现一致,其中雪莲果的评分最高,尤其是对铀的吸收富集综合评分达到 1.195,表明雪莲果对铀、镉复合污染的正向综合响应最好。

3 讨论

植物对铀、镉的耐受性不同,因此生物量受到的影响程度也不同。铀、镉处理促进了雪莲果的生长,其原因可能是铀、镉促使雪莲果土壤菌根共生体的建立,从而改善雪莲果对一种或者几种营养元素的吸收

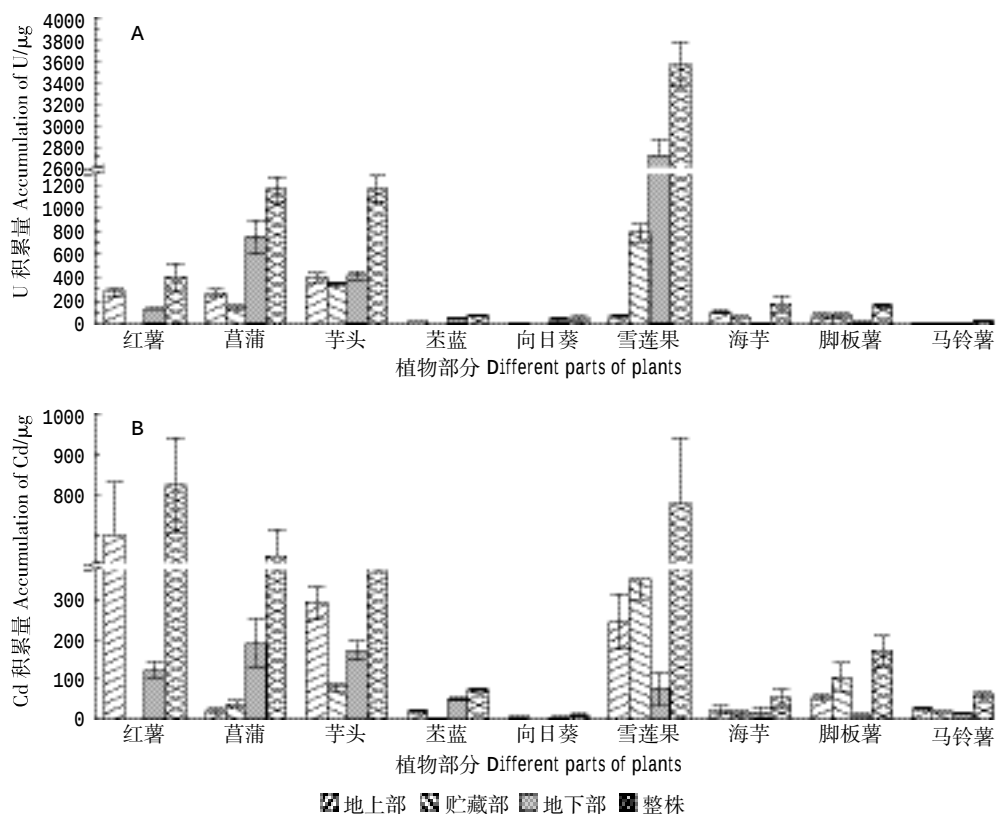


图2 铀、镉复合污染处理下植物铀镉积累量

Figure 2 U and Cd accumulation amounts under U and Cd treatments

表 7 各植物综合评价得分
Table 7 The complex scores of different plant species

供试植物 Plant species	综合评价得分 Complex scores		总分 Total scores
	U	Cd	
雪莲果 <i>S. involucreta</i>	1.195	0.834	2.029
芋头 <i>C. esculenta</i> L.	0.384	0.641	1.024
菖蒲 <i>A. calamus</i> L.	0.174	0.337	0.511
红薯 <i>I. batatas</i>	-0.801	0.330	-0.471
马铃薯 <i>S. tuberosum</i>	-0.451	0.071	-0.380
脚板薯 <i>I. Dioscorea Transversa</i>	-0.128	-0.128	-0.257
苤蓝 <i>B. oleracea</i>	-0.405	-0.405	-0.810
海芋 <i>A. macrorrhiza</i> L.	0.094	-0.651	-0.556
向日葵 <i>H. annuus</i>	-0.744	-1.028	-1.773

与运输,有助于雪莲果植株在铀、镉逆境中的生长^[22]。

块根、块茎植物的根茎生物量占整株生物量的比重较大,因此探究铀、镉在植物块茎、块根与其余各部之间的转运情况能更深入地了解这类植物转运铀、镉的途径及各部转运能力。试验中大多数植物的根部铀、镉含量高于地上部和贮藏部,尤其是铀元素的根部含量更远大于地上部和贮藏部,说明相较于镉,铀更不容易从根部被转运至其他部位。其主要原因可能是由于铀元素分子量较大,植物的蒸腾拉力不足以提供铀向上运输的动力,还有可能是因为这些植物体内缺乏铀的相关转运蛋白^[23-24],本结果与聂惠、陈磊等的研究结果一致^[25-26]。再比较地下部向贮藏部的转运系数和贮藏部向地上部的转运系数发现,贮藏部的铀、镉转出能力强于铀、镉转入能力。这可能是植物主要器官规避重金属迫害的途径之一,此结果与武倩倩等^[27]研究一致。

雪莲果综合评价最高。雪莲果的各部铀、镉含量均不是最高,但由于各部生物量较大,对铀、镉的单株绝对积累量达 3 564.75 μg,单盆铀积累量高达10 694.25 μg,远远大于唐永金等^[28]研究中菊苣的最高积累量,也高于姚天月等^[14]研究中铀的超富集植物吊竹梅单株积累量。由此可见植物生物量对重金属元素的吸收富集影响非常大。很多研究表明^[29],向日葵地下部对铀具有较强的富集作用。本试验中,向日葵根部的铀含量仅为雪莲果根部铀含量的 16.18%,雪莲果单株富集系数是向日葵的 23.84 倍,在本试验条件下,雪莲果对铀、镉的富集特性优于铀的富集植物向日葵。

重金属复合污染相较于单一重金属污染的修复难度大、情况复杂,铀的修复更是难于其余重金属,迄

今为止几乎没有铀的超富集植物的报道。雪莲果隶属多年生草本菊科植物,生物量大,自然环境中平均可生长到 2~3 m 高,在铀、镉复合污染中的耐受性较强,虽然其对铀的富集效果未严格达到超富集植物的要求,但若通过一些技术手段如施加螯合剂和激素^[30-32]、采取有效的种植方式等,均可提高其对铀的吸收富集效果^[33-34],从这一角度来看,雪莲果具有修复铀、镉复合污染的潜力。与雪莲果相反,苤蓝、马铃薯铀、镉含量和富集系数均处于 9 种植物中的较低水平,尤其是苤蓝的主要食用部位块茎的铀、镉富集系数仅为 0.016 和 0.162。苤蓝的这一特性可被应用在铀、镉污染土壤的再利用上,结合合理的种植技术,保证进入种植在铀、镉污染土中的苤蓝铀、镉含量处于安全食用范围,从而达到污染土再利用的目的。

4 结论

- (1)不同植物对铀、镉的耐受性不同,本文研究的植物中雪莲果耐受性最强。
- (2)根茎类植物富集铀、镉的主要部位为根部,贮藏部的富集能力最弱,但铀、镉从贮藏部位的转出作用强于转入作用。
- (3)芋头、雪莲果、菖蒲为富集铀、镉的优势植物,其中雪莲果富集能力较强。由于雪莲果有膨大的块状茎,生物量大,存在用于植物修复的潜质;苤蓝、马铃薯几乎不吸收铀、镉,尤其是主要食用器官块茎,有应用于污染土再利用的潜质。

参考文献:

[1] 郑洁敏, 宋 亮. 放射性 Cs 污染土壤的植物修复及其影响因素[J]. 杭州农业科技, 2006(1): 33-35.
ZHENG Jie-min, SONG Liang. The Phytoremediation and effects on the soil polluted by radioactive caesium[J]. Hangzhou Agricultural Science and Technology, 2006(1): 33-35.

[2] 刘雨芳, 许中坚, 刘文海, 等. 铀尾矿库中重金属元素的生态迁移风险研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 153-156.
LIU Yu-fang, XU Zhong-jian, LIU Wen-hai, et al. Study on ecological migration risks of heavy metals in uranium tailings dam[J]. Journal of Soil and Water, 2009, 23(2): 153-156.

[3] 周启星, 宋玉芳, 孙铁珩. 生物修复研究与应用进展[J]. 自然科学进展, 2004, 14(7): 2-9.
ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang, SUN Tie-heng. The study and development on bioremediation[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14(7): 2-9.

[4] Schindler F, Gube M, Kothe E. Bioremediation and heavy metal uptake: Microbial approaches at field scale[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2012: 365-383.

- [5] Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 126:111-121.
- [6] Georgiev P, Groudev S, Spasova I, et al. Ecotoxicological characteristic of a soil polluted by radioactive elements and heavy metals before and after its bioremediation[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 142:122-129.
- [7] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜(*Viola baoshanensis*): 一种新的镉超富集植物[J]. *科学通报*, 2003, 48(19):2046-2049.
LIU Wei, SHU Wen-sheng, LAN Chong-yu. *Viola baoshanensis*: A new hyperaccumulator of Cd[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19):2046-2049.
- [8] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, et al. Phytoremediation potential of *Thlaspi caerulescens* and bladder campion for zinc and cadmium-contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(6):123-134.
- [9] Pugazholi P, Babypriya A, Yadav K R, et al. Phytoremediation: Removal of heavy metals from soil using *Helianthus annuus*[J]. *Research Journal of Engineering & Technology*, 2013, 4(4):242-245.
- [10] Tomé F V, Rodríguez P B, Lozano J C. The ability of *Helianthus annuus* and *Brassica juncea* to uptake and translocate natural uranium and ^{226}Ra under different milieu conditions[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(2):293-300.
- [11] 姚天月, 王丹, 李泽华, 等. 8种花卉植物对土壤中铀富集特性研究[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(2):24-30.
YAO Tian-yue, WANG Dan, LI Ze-hua, et al. Enrichment characteristics of eight ornamental plants to uranium in soil[J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 39(2):24-30.
- [12] 唐丽, 柏云, 邓大超, 等. 修复铀污染土壤超积累植物的筛选及积累特征研究[J]. *核技术*, 2009, 32(2):136-141.
TANG Li, BAI Yun, DENG Da-chao, et al. The selection and enrichment characteristics of hyperaccumulators in the soil polluted by uranium[J]. *Nuclear Techniques*, 2009, 32(2):136-141.
- [13] 徐俊, 龚永兵, 张倩慈, 等. 三种植物对铀耐性及土壤中铀吸收积累差异的研究[J]. *化学研究与应用*, 2009, 21(3):322-326.
XU Jun, GONG Yong-bing, ZHANG Qian-ci, et al. Comparison of uranium from soil and tolerance by three herb species[J]. *Chemical Research and Application*, 2009, 21(3):322-326.
- [14] Singh S, Malhotra R, Bajwa B S. Uranium uptake studies in some plants[J]. *Radiation Measurements*, 2005, 40(2/3/4/5/6):666-669.
- [15] Georgiev P, Groudev S, Spasova I, et al. Ecotoxicological characteristic of a soil polluted by radioactive elements and heavy metals before and after its bioremediation[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 142:122-129.
- [16] 何启贤. 镉超富集植物筛选研究进展[J]. *环境保护与循环经济*, 2013, 33(1):46-49.
HE Qi-xian. The progress in the selection of Cd hyperaccumulators[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2013, 33(1):46-49.
- [17] 魏树和, 杨传杰, 周启星. 三叶鬼针草等7种常见菊科杂草植物对重金属的超富集特征[J]. *环境科学*, 2008, 29(10):2912-2918.
WEI Shu-he, YANG Chuan-jie, ZHOU Qi-xing. Hyperaccumulative characteristics of 7 widely distributing weed species in composite family especially *Bidens pilosa* to heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10):2912-2918.
- [18] 赵达伟. 铜污染土壤的超富集、富集植物筛选[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
ZHAO Wei-da. The selection of hyperaccumulators and accumulators in soil polluted by copper[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2011.
- [19] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选[J]. *自然科学进展*, 2003, 13(12):29-35.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. The selection of heavy mental hyperaccumulators from weed[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(12):29-35.
- [20] 李翠兰, 邵泽强, 王玉军, 等. 几种花卉植物对铅富集特征的研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4):127-134.
LI Cui-lan, SHAO Ze-qiang, WANG Yu-jun, et al. Enrichment characteristics of Pb by several kinds of ornamental plants[J]. *Journal of Soil and Water*, 2010, 24(4):127-134.
- [21] 吴桐, 李翠兰, 邵泽强, 等. 几种花卉植物对土壤中铅富集特征的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2012, 34(3):305-310.
WU Tong, LI Cui-lan, SHAO Ze-qiang, et al. Enrichment characteristics of several ornamental plants to lead in soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(3):305-310.
- [22] Somashekaraiah B V, Padmaja K, Prasad A R K, et al. Phytotoxicity of cadmium ions on germination seeding of mung bean: Involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation[J]. *Plant Physiology*, 1992, 85(1):85-89.
- [23] 申鸿, 陈保东, 冯固, 等. 锌污染土壤接种丛枝菌根真菌对玉米苗期生长的影响[J]. *农业环境保护*, 2002, 21(5):399-402.
SHEN Hong, CHEN Bao-dong, FENG Gu, et al. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth in a zinc polluted soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5):399-402.
- [24] Persans M W, Nieman K, Salt D E. Functional activity and role cation-efflux family members in Ni hyperaccumulation in *Thlaspi goesingense* [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(17):9995-10000.
- [25] 聂惠, 安玉麟, 李素萍. 向日葵对重金属胁迫反应及其植物修复的研究进展[J]. *黑龙江农业科学*, 2010(9):88-91.
NIE Hui, AN Yu-lin, LI Su-ping. Review on sunflower response and phytoremediation to heavy metal stress[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2010(9):88-91.
- [26] 陈磊, 胡敏予. 重金属污染土壤的植物修复技术研究进展[J]. *化学与生物工程*, 2014, 31(4):6-8.
CHEN Lei, HU Min-yu. Research progress in phytoremediation of heavy metal pollution in soil[J]. *Chemistry and Bioengineering*, 2014, 31(4):6-8.
- [27] 武倩倩. 块根、块茎类植物修复土壤铅、镉污染的试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
WU Qian-qian. The phytoremediation experimental study of root tuber plants and tuber plants for Pb, Cd contaminated soil[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [28] 唐永金, 罗学刚, 曾峰, 等. 不同植物对高浓度铀胁迫的响应与铀

- 富集植物筛选[J]. 核农学报, 2013, 27(12):1920-1926.
- TANG Yong-jin, LUO Xue-gang, ZENG Feng, et al. Response of plants to high concentrations of uranium stress and the screening of re-mediation plants[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(12):1920-1926.
- [29] Slavik Dushenkov, Dev Vasudev, Yoram Kapulnik, et al. Removal of uranium from water using terrestrial plants[J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(12):3468-3474.
- [30] 任丽娟, 柴琳琳, 郭 昱, 等. 螯合剂对镉在土壤和紫花苜蓿中积累的影响研究[J]. 新疆大学学报:自然科学版, 2015(3):330-335.
- REN Li-juan, CHAI Lin-lin, GUO Yu, et al. Study of enrichment for Cd in Alfalfa from three agents[J]. Journal of Xinjiang University Natural Science, 2015(3):330-335.
- [31] 王爱国. 美洲商陆(*Phytolacca americana* L.)对 Mn、Cd、Cu 的积累特性和 EDDS 螯合诱导植物修复研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
- WANG Ai-guo. Accumulation of manganese, cadmium and copper by *Phytolacca americana* L. and EDDS-enhanced phytoextraction of contaminated soils[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [32] 郑君健, 刘 杰, 张学洪, 等. 重金属污染土壤植物修复及强化措施研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18):159-164.
- ZHENG Jun-jian, LIU Jie, ZHANG Xue-hong, et al. Research progress of phytoremediation and strengthening measures for soil contaminated by heavy metals[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(18):159-164.
- [33] 卫泽斌, 郭晓方, 丘锦荣, 等. 间套作体系在污染土壤修复中的应用研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3):267-272.
- WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, QIU Jin-rong, et al. Innovative technologies for soil remediation: Intercropping or co-cropping[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2010, 29(3):267-272.
- [34] 张广鑫, 王 鑫, 陈 刚. 解析间套作体系在污染土壤中的应用研究进展[J]. 科技创新导报, 2013(3):157.
- ZHANG Guang-xin, WANG Xin, CHEN Gang. Analysis in the study progress on the intercropping or co-cropping system in the polluted soil [J]. Science and Technology Consulting Herald, 2013(3):157.