

球序卷耳的镉积累特性研究

胡容平¹,石 军²,黄廷友²,林立金^{3*}

(1. 四川省农业科学院 植物保护研究所/农业部西南作物有害生物综合治理重点实验室,四川 成都 610066;
2. 绵阳市农业科学研究院,四川 绵阳 621023; 3. 四川农业大学 果蔬研究所,四川 成都 611130)

摘要: 通过盆栽试验,研究了球序卷耳在不同镉含量处理下的生长状况及镉积累特征,以期筛选出新的用于农田镉污染修复的镉富集植物。结果表明,随着土壤中镉含量的增加,球序卷耳的生物量及其叶片光合色素含量呈降低的趋势。从镉含量来看,球序卷耳的根系、地上部分的镉含量均随着土壤中镉含量的增加而升高,在镉含量为 75 mg/kg 时,球序卷耳根系镉含量为 684.78 mg/kg,地上部分镉含量为 110.02 mg/kg,超过了镉超富集植物的临界值。球序卷耳根系和地上部分镉富集系数均大于 1,但转运系数小于 1。因此,球序卷耳是一种镉富集植物。就镉积累量而言,球序卷耳根系、地上部分及整株的镉积累量均与土壤中镉含量呈显著或极显著的线性正相关。综上所述,球序卷耳能够用于农田镉污染土壤的修复。

关键词: 球序卷耳; 镉积累特性; 镉富集植物; 镉污染农田; 土壤修复

中图分类号: X53;X171 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 3268(2015)10 - 0085 - 05

Cadmium Accumulation Characteristics of *Cerastium glomeratum*

HU Rongping¹,SHI Jun²,HUANG Tingyou²,LIN Lijin^{3*}

(1. Institute of Plant Protection,Sichuan Academy of Agricultural Sciences/MOA Key Laboratory of Integrated Management of Pests on Crops in Southwest China,Chengdu 610066,China; 2. Mianyang Academy of Agricultural Sciences,Mianyang 621023,China; 3. Institute of Pomology and Olericulture,Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130,China)

Abstract: To screen new cadmium accumulator for phytoremediation of cadmium contaminated farmland soil,a pot experiment was done to study the cadmium accumulation characteristics and growth of *Cerastium glomeratum* exposed to different concentrations of cadmium. The results showed that with the increase of the cadmium concentration in soil,the biomasses and leaf light pigmentation content of *C. glomeratum* showed a decreasing trend. The cadmium contents in roots and shoots of *C. glomeratum* increased with the increase of cadmium concentration in soil. When the concentration of cadmium in the soil was 75 mg/kg,the cadmium content in roots and shoots of *C. glomeratum* was 684.78 mg/kg and 110.02 mg/kg,exceeding the critical value of cadmium hyperaccumulator. The root and shoot bioconcentration factors of *C. glomeratum* exceeded one,but the translocation factor was lower than one. Therefore,*C. glomeratum* was a cadmium accumulator. The cadmium accumulation in roots,shoots and whole plants of *C. glomeratum* showed the significant linear positive correlation with the concentration of cadmium in soil. In summary,*C. glomeratum* could be used for phytoremediation of cadmium contaminated farmland soil.

Key words: *Cerastium glomeratum*; cadmium accumulation characteristics; cadmium hypertolerant plants; cadmium contaminated farmland; soil remediation

收稿日期:2015 - 03 - 20
基金项目:四川省科学技术厅应用基础项目(2014JY0046);四川省农业科学院青年基金项目(2014CXSF - 018)
作者简介:胡容平(1980 -),男,四川营山人,助理研究员,硕士,主要从事植物病理及生物防治研究。
E - mail:44573780@qq.com
* 通讯作者:林立金(1980 -),男,四川龙泉驿人,副研究员,博士,主要从事果树生理生态及栽培研究。
E - mail:llj800924@163.com

近年来,土壤中重金属污染日益严重,这不仅影响作物的产量和品质,而且其可能进入食物链影响人体健康^[1]。镉是生物毒性最强的元素之一,在环境中的化学活性强,移动性大,毒性持久,是植物生长的非必需元素,其在植物体内达到一定浓度就会引起毒害症状^[2]。前人研究发现,镉胁迫会抑制植物生长激素的合成^[3],破坏植物细胞膜结构和功能,干扰细胞内一系列代谢过程^[4],进而阻碍植物种子萌发^[5],使植物生物量下降^[6]。镉进入人体后,直接影响人的生殖系统和子代发育,对人体具有三致(致病、致癌、致突变)作用^[7-8]。鉴于此,对镉污染土壤的治理已迫在眉睫,引起了国内外的广泛重视。

植物修复技术是利用超富集植物从被污染的环境介质中去除重金属污染物或降低重金属污染风险的一类新技术^[9]。相对于传统的物理、化学修复技术等而言,植物修复技术有不可替代的优势,主要表现在对土壤环境扰动小、治理效果永久、不破坏场地结构、不引起二次污染、重金属可再循环和部分回收、应用面积大、后期处理简易等^[10]。超富集植物的筛选是重金属污染土壤植物修复技术的基础和核心,而利用超富集植物对重金属污染土壤进行修复是近年来环境科学的研究热点之一^[11]。天蓝遏兰菜(*Thlaspi caerulescens*)是第一种被发现的镉超富集植物,在土壤镉含量为 1 020 mg/kg 时,其地上部分镉含量达 1 800 mg/kg,远远超出其他普通植物所能忍受的极限^[12]。之后,东南景天^[13]、龙葵^[14]、商陆^[15]、水葱^[16]等镉超富集植物相继被发现。在已发现的 500 多种超富集植物中,镉超富集植物只有 20 余种^[17],且这些镉超富集植物生物量普遍较低、个体矮小、生长缓慢^[18],导致修复治理效率低、周期长,其中大多还具有很强的地域性,很难大面积推广,制约了大规模的应用。因此,对镉超富集植物的筛选仍是非常重要的基础工作。

球序卷耳(*Cerastium glomeratum*)是石竹科卷耳属 2 年生或 1 年生草本植物,为常见的田间杂草。在前期初步研究中发现,球序卷耳能够在镉含量为 60 mg/kg 的土壤上正常生长,其地上部分镉含量达到 89.11 mg/kg,可能是一种镉富集植物。为此,研究了球序卷耳在不同镉含量条件下的生长状况以及对镉的积累特性,鉴定其镉富集特性,以期为农田镉污染修复提供一种新材料。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试植物为球序卷耳幼苗,取自四川农业大学

雅安校区农场未污染区;供试土壤为紫色土,取自四川农业大学雅安校区农场农田,其基本理化性质为:pH 值 6.94,有机质含量 43.64 g/kg,全氮含量 3.63 g/kg,全磷含量 0.38 g/kg,全钾含量 17.54 g/kg,碱解氮含量 195.00 mg/kg,速效磷含量 6.25 mg/kg,速效钾含量 191.13 mg/kg,全镉含量 0.103 g/kg,有效态镉含量 0.022 mg/kg^[19]。

1.2 试验设计

2014 年 2 月,将土壤风干,压碎,过 5 mm 筛,然后分别称取 3.0 kg 装于 15 cm × 18 cm (高 × 直径)的塑料盆内,加入 CdCl₂ 溶液,使其与土壤充分混匀,保持淹水状态,自然放置平衡 4 周后再次混合备用。向土壤中加入镉,使其含量分别为 0 mg/kg (对照)、25 mg/kg、50 mg/kg、75 mg/kg、100 mg/kg、125 mg/kg。2014 年 3 月,选择长势一致、2 对真叶展开的球序卷耳幼苗移栽至盆中,每盆种植 6 株,每个处理重复 3 次,每天浇水以保持盆中土壤含水量约为田间持水量的 80%。

1.3 测定项目及方法

在球序卷耳生长 60 d (盛花期)时,采用丙酮-乙醇(1:1)混合浸提法测定叶片的光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素)含量^[20]。之后,整株收获,将根系和地上部分分别用自来水洗净,再用去离子水冲洗 3 次。将根系和地上部分于 110 ℃ 杀青 15 min,75 ℃ 烘干至恒质量,称质量,粉碎,过 0.149 mm 筛。植物样品加入硝酸-高氯酸(体积比为 4:1),放置 12 h 消化至溶液透明,过滤,定容至 50 mL,用 iCAP 6300 型 ICP 光谱仪(Thermo Scientific, USA)测定镉含量^[21]。然后计算相关指标,抗性系数 = 处理组总生物量/对照组总生物量^[22],富集系数(BCF) = 根系镉含量(地上部分镉含量)/土壤镉含量^[23],转运系数(TF) = 植物地上部分镉含量/根系镉含量^[24],转运量系数(TAF) = (地上部分镉含量 × 地上部分生物量)/(根系镉含量 × 根系生物量)^[25]。

1.4 数据处理

数据采用 DPS 进行方差分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同镉含量对球序卷耳生物量的影响

由表 1 可知,随着土壤中镉含量的增加,球序卷耳根系、地上部分生物量及总生物量均呈降低趋势。与对照相比,镉含量为 25、50、75、100、125 mg/kg 处理的球序卷耳根系生物量分别显著下降了 21.54%、

25.25%、26.88%、33.76%、37.47%,地上部分生物量分别下降了15.57%、28.34%、35.61%、46.74%、51.96%,总生物量分别下降了16.78%、27.71%、33.84%、44.10%、49.02%。随着土壤中镉含量的增加,球序卷耳根冠比总体呈上升趋势,说明球序卷

耳可能通过增加根系所占比重来提高对镉污染的耐性。镉污染土壤中球序卷耳的抗性系数均低于对照,且随镉含量增加,抗性系数逐渐降低,在镉含量为125 mg/kg时,球序卷耳抗性系数降低了近50%,说明高浓度的镉能够明显减弱球序卷耳的抗性。

表 1 不同镉含量对球序卷耳生物量的影响

| 镉含量/(mg/kg) | 生物量 | | 根冠比 | 总生物量/(g/盆) | 抗性系数 |
|-------------|---------------|--------------|-------|--------------|-------|
| | 根系/(g/盆) | 地上部分/(g/盆) | | | |
| 0 | 1.105±0.076a | 4.330±0.112a | 0.255 | 5.435±0.188a | 1.000 |
| 25 | 0.867±0.035b | 3.656±0.070b | 0.237 | 4.523±0.105b | 0.832 |
| 50 | 0.826±0.041bc | 3.103±0.104c | 0.266 | 3.929±0.145c | 0.723 |
| 75 | 0.808±0.025c | 2.788±0.052d | 0.290 | 3.596±0.077d | 0.662 |
| 100 | 0.732±0.018d | 2.306±0.025e | 0.317 | 3.038±0.043e | 0.559 |
| 125 | 0.691±0.013d | 2.080±0.093f | 0.332 | 2.771±0.106f | 0.510 |

注:同列数据后不同小写字母表示在0.05水平差异显著,下同。

2.2 不同镉含量对球序卷耳光合色素含量的影响

从表2可以看出,球序卷耳叶片的叶绿素a含量、叶绿素b含量、叶绿素总量及类胡萝卜素含量都随着土壤中镉含量的增加而呈降低趋势,但在镉含量低于100 mg/kg时,与对照差异均不显著。在镉含量为100 mg/kg及以上时,球序卷耳叶绿素a含量、叶绿素总量及类胡萝卜素含量均与对照差异显著。在镉含量为100 mg/kg、125 mg/kg时,球

序卷耳叶绿素总量较对照分别显著降低了7.63%、31.41%,类胡萝卜素含量较对照分别显著降低了8.13%、28.18%。就叶绿素a/b而言,随土壤中镉含量的增加,叶绿素a/b呈高低起伏的变化;除镉含量为100 mg/kg处理之外,其余处理的叶绿素a/b值均高于对照,其中镉含量为125 mg/kg时叶绿素a/b值最大,较对照提高了0.187。

表 2 不同镉含量对球序卷耳光合色素含量的影响

| 镉含量/(mg/kg) | 叶绿素 a/(mg/g) | 叶绿素 b/(mg/g) | 叶绿素总量/(mg/g) | 叶绿素 a/b | 类胡萝卜素/(mg/g) |
|-------------|---------------|--------------|---------------|---------|---------------|
| 0 | 1.022±0.006a | 0.223±0.001a | 1.245±0.007a | 4.583 | 0.369±0.002a |
| 25 | 1.013±0.001ab | 0.217±0.003a | 1.230±0.004ab | 4.668 | 0.359±0.003ab |
| 50 | 0.996±0.003ab | 0.215±0.012a | 1.211±0.015ab | 4.633 | 0.358±0.002ab |
| 75 | 0.976±0.007ab | 0.210±0.008a | 1.187±0.015ab | 4.648 | 0.351±0.002ab |
| 100 | 0.943±0.063b | 0.207±0.001a | 1.150±0.064b | 4.556 | 0.339±0.015b |
| 125 | 0.706±0.070c | 0.148±0.020b | 0.854±0.090c | 4.770 | 0.265±0.024c |

2.3 不同镉含量对球序卷耳镉含量的影响

由表3可以看出,球序卷耳根系、地上部分的镉含量均随土壤中镉含量的增加而显著升高。与对照相比,镉含量为25、50、75、100、125 mg/kg处理的球序卷耳根系镉含量分别是对照的9.89、12.05、14.09、15.46、17.11倍,地上部分镉含量分别是对照的7.22、12.93、17.80、22.64、26.36倍。当镉含量达到75 mg/kg后,球序卷耳地上部分镉含量超过镉超富集植物的镉含量临界值(100 mg/kg)^[26-27]。就富集系数而言,球序卷耳根系及地上部分镉富集系数均大于1,且两者均随着土壤中镉含量的增加而呈现降低趋势。对照球序卷耳的镉转运系数为0.13,而在镉处理条件下,球序卷耳的镉转运系数随着镉含量的增加总体呈升高趋势,其值为0.093~0.196,都小于1,没有达到镉超富集植物的标准^[26-27]。综上,球序卷耳不属于镉超富集植物,属于镉富集

植物。

表 3 不同镉含量对球序卷耳镉含量的影响

| 镉含量/(mg/kg) | 根系/(mg/kg) | 地上部分/(mg/kg) | 富集系数 | | 转运系数 |
|-------------|---------------|--------------|-------|------|-------|
| | | | 根系 | 地上部分 | |
| 0 | 48.59±1.30f | 6.18±0.17f | | | 0.130 |
| 25 | 480.56±10.56e | 44.65±0.02e | 19.22 | 1.79 | 0.093 |
| 50 | 585.28±15.72d | 79.93±3.59d | 11.71 | 1.60 | 0.137 |
| 75 | 684.78±15.46c | 110.02±1.12c | 9.13 | 1.47 | 0.161 |
| 100 | 751.37±24.31b | 139.92±3.26b | 7.51 | 1.40 | 0.186 |
| 125 | 831.35±28.87a | 162.91±4.59a | 6.65 | 1.30 | 0.196 |

2.4 不同镉含量对球序卷耳镉积累量的影响

由表4可看出,球序卷耳根系镉积累量随着土壤中镉含量的增加总体呈升高趋势。镉含量为25、50、75、100、125 mg/kg处理的球序卷耳根系镉积累量分别是对照的7.76、9.00、10.31、10.24、10.70倍。球序卷耳地上部分以及整株镉积累量均随着土壤中镉含量的增加而升高,镉含量为25、50、75、

100、125 mg/kg 处理的球序卷耳地上部分镉积累量分别是对照的 6.11、9.27、11.47、12.07、12.67 倍,整株镉积累量分别是对照的 7.21、9.09、10.69、10.85、11.36 倍。在不同镉含量处理下,球序卷耳的镉转运量系数随着土壤中镉含量的增加总体呈升高趋势,但均小于 1,其值介于 0.392~0.590。

表 4 不同镉含量对球序卷耳镉积累量的影响

| 镉含量/ (mg/kg) | 根系/ (μg/盆) | 地上部分/ (μg/盆) | 整株/ (μg/盆) | 转运量系数 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| 0 | 53.69 ± 4.06d | 26.74 ± 2.96f | 80.43 ± 7.02e | 0.498 |
| 25 | 416.65 ± 21.17c | 163.25 ± 9.51e | 579.90 ± 30.68d | 0.392 |
| 50 | 483.44 ± 3.99b | 248.00 ± 16.98d | 731.44 ± 20.97c | 0.513 |
| 75 | 553.30 ± 0.23a | 306.73 ± 4.00c | 860.03 ± 4.23b | 0.554 |
| 100 | 550.00 ± 27.56a | 322.66 ± 21.52b | 872.66 ± 49.08b | 0.587 |
| 125 | 574.46 ± 27.43a | 338.85 ± 11.64a | 913.31 ± 39.07a | 0.590 |

2.5 球序卷耳镉积累量与土壤中镉含量的回归分析

由表 5 可见,球序卷耳根系、地上部分以及整株的镉积累量与土壤中镉含量存在线性关系,其中球序卷耳根系镉积累量与土壤中镉含量的相关性达到显著水平,而球序卷耳地上部分以及整株的镉积累量与土壤中镉含量的相关性达到了极显著水平。

表 5 球序卷耳镉积累量与土壤中镉含量的回归分析

| 因变量 | 回归方程 | 相关系数 |
|----------|--------------------------|----------|
| 根系镉积累量 | $y = 3.5129x + 219.0357$ | 0.8327* |
| 地上部分镉积累量 | $y = 2.3972x + 84.5495$ | 0.9324** |
| 整株镉积累量 | $y = 5.9100x + 303.5952$ | 0.8778** |

注: *、** 分别表示相关性显著 ($P < 0.05$)、极显著 ($P < 0.01$)。

3 讨论

超富集植物根系吸附重金属离子有 2 种方式:一是根系呼出 CO₂ 形成碳酸,或直接分泌出柠檬酸、草酸等有机酸,与土壤中的重金属离子进行交换;二是发达的根系和稠密的根毛主动向土壤污染区伸展,根毛直接接触土壤颗粒,吸取重金属^[28]。普通植物细胞内的重金属离子超过一定水平时,会使细胞代谢平衡失调,细胞崩解或萎缩,而超富集植物根系能分泌大量的有机酸、植物络合素、金属硫蛋白等金属络合物,它们能够整合细胞内的重金属离子,增加其溶解性,提高植物细胞对重金属离子的抗性和运输能力^[29-30]。本研究结果表明,随着土壤中镉含量的增加,球序卷耳的生物量虽呈降低的趋势,但并未出现叶片变黄、茎秆细弱、根系变黑等^[31]重金属胁迫的毒害症状,说明球序卷耳对镉的耐性较强。从根冠比来看,随土壤中镉含量的增加,球序卷耳的根冠比呈增大的趋势,说明球序卷耳以增加根系所占比重来增强对镉的耐性。光合色素含量是评价植物生长状况的重要指标,球序卷耳叶片光合色素含量都随着土壤中镉含量的增加而呈降低的趋

势,但在镉含量低于 100 mg/kg 时光合色素含量降低不显著,这也说明球序卷耳对镉有较强的耐性。

按照 Baker 等^[26]、Salt 等^[27]提出的超富集植物标准,镉超富集植物地上部分镉含量的临界值为 100 mg/kg。本试验表明,随土壤中镉含量的增加,球序卷耳根系及地上部分的镉含量均显著增加。土壤中镉含量为 25 mg/kg 时,球序卷耳的根系镉含量达到了 480.56 mg/kg;而土壤中镉含量为 75 mg/kg 时,球序卷耳地上部分镉含量超过 100 mg/kg,为 110.02 mg/kg,达到了镉超富集植物的临界含量标准^[26-27]。从富集系数和转运系数来看,球序卷耳根系和地上部分镉富集系数在各个镉含量处理下均大于 1,达到超富集植物的要求^[26-27],但各个镉含量下的球序卷耳镉转运系数均小于 1,没有达到超富集植物的要求^[26-27]。因此,球序卷耳不是镉超富集植物,仅是一种镉富集植物。

球序卷耳为 1 年生草本,株高 10~20 cm,生于山坡草地,全世界均有分布^[32]。根据本研究的野外调查发现,球序卷耳也是常见的田间杂草,繁殖力极强,生长密度大,主要生长于冬春季节。本试验研究表明,球序卷耳根系、地上部分及整株镉积累量均随土壤中镉含量的增加而增加,且均与土壤中镉含量呈显著的线性正相关。在土壤中镉含量为 125 mg/kg 时,球序卷耳根系、地上部分、整株镉积累量均达到最大值,分别为 574.46、338.85、913.31 μg/盆。因此,球序卷耳能够用于冬春季节农田镉污染土壤的修复。

参考文献:

[1] 曾咏梅,毛昆明,李永梅. 土壤中镉污染的危害及其防治对策[J]. 云南农业大学学报,2005,20(3):360-365.
[2] 余淑娟,高树芳,屈应明,等. 不同土壤条件下镉对番茄根系的毒害效应及其毒害临界值研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(4):640-646.

- [3] 黄运湘,廖柏寒,肖浪涛,等. 镉处理对大豆幼苗生长及激素含量的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1398-1401.
- [4] Gouia H, Suzuki A, Brulfert J, et al. Effects of cadmium on the co-ordination of nitrogen and carbon metabolism in bean seedlings [J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160:367-376.
- [5] Peralta J R, GardeaTorresdey J L, Tiemann K J, et al. Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 66(6): 727-734.
- [6] Varalakshmi L R, Ganeshamurthy A N. Phytotoxicity of cadmium in radish and its effects on growth, yield, and cadmium uptake [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44(9): 1444-1456.
- [7] Moreno-Caselles J, Moral R, Perez-Espinosa A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant [J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, 23(2): 243-250.
- [8] Moriarty F. Ecotoxicology: The study of pollutants in ecosystems [M]. London: Academic Press, 1999: 29-35.
- [9] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 881-893.
- [10] 王海慧, 郇恒福, 罗瑛, 等. 土壤重金属污染及植物修复技术[J]. 中国农学通报, 2009, 25(11): 210-214.
- [11] Marques A P G C, Rangel A O S S, Rangel P M L. Remediation of heavy metal contaminated soils: Phytoremediation as a potentially promising clean-up technology [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2009, 39(8): 622-654.
- [12] 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): 1151-1157.
- [13] 熊愈辉, 杨肖娥, 叶正钱, 等. 东南景天对镉、铅的生长反应与积累特性比较[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 101-106.
- [14] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [15] 聂发辉. 镉超富集植物商陆及其富集效应[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 303-306.
- [16] 李硕, 刘云国, 李永丽, 等. 水葱对镉的超富集作用及其用于植物修复的潜力[J]. 广西植物, 2007, 27(2): 180-185.
- [17] 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.
- [18] Maestri E, Marmiroli M, Visioli G, et al. Metal tolerance and hyperaccumulation: Costs and trade offs between traits and environment [J]. Environmental and Experimental Botany, 2010, 68(1): 1-13.
- [19] 林立金, 宁博, 廖明安, 等. 冬季农田杂草繁缕对镉的积累特性研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 673-678.
- [20] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理学实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 赵杨迪, 潘远智, 刘碧英, 等. Cd、Pb 单一及复合污染对花叶冷水花生长的影响及其积累特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 48-53.
- [23] Zhang X F, Xia H P, Li Z, et al. Identification of a new potential Cd-hyperaccumulator *Solanum photeinocarpum* by soil seed bank-metal concentration gradient method [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 189(1/2): 414-419.
- [24] Rastmanesh F, Moore B, Keshavarzi. Speciation and phytoavailability of heavy metals in contaminated soils in Sarcheshmeh area, Kerman province, Iran [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 85(5): 515-519.
- [25] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138.
- [26] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—A review of their distribution: Ecology and Photochemistry [J]. Biorecovery, 1989, 1: 81-126.
- [27] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. Biotechnology, 1995, 13(5): 468-474.
- [28] 闫研, 李建平, 赵志国, 等. 超富集植物对重金属耐受和富集机制的研究进展[J]. 广西植物, 2008, 28(4): 505-510.
- [29] Gong J M, Lee D A, Schroeder J I. Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatin and cadmium in *Arabidopsis* [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(17): 10118-10123.
- [30] 殷恒霞. 重金属超富集植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 对 Cd 耐受和富集的生理和分子机制初探[D]. 西宁: 青海师范大学, 2010.
- [31] 梁芳, 郭晋平. 植物重金属毒害作用机理研究进展[J]. 山西农业科学, 2007, 35(11): 59-61.
- [32] 唐昌林, 柯平, 鲁德全, 等. 中国植物志 (第 26 卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1996.