

锌、铁缺失对苧麻吸收及转运重金属镉的影响

余 玮, 崔国贤*, 赵丹博, 肖呈祥

(湖南农业大学苧麻研究所, 长沙 410128)

摘 要:通过连续两季盆栽试验,研究锌、铁对2个苧麻品种中苧一号和湘苧三号吸收及转运重金属镉的影响。结果表明,2个苧麻品种在镉胁迫($5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下表现不同。锌、铁能促进苧麻的生长,无锌、铁供应时,镉胁迫下的2个苧麻品种与对照相比,株高下降10.24%~21.64%,茎叶干重下降1.02%~6%,根干重下降2.04%~12.24%。苧麻各部位镉含量大小依次是根>茎>叶。锌、铁显著影响苧麻镉含量,锌、铁缺失促使苧麻吸收更多的镉。无锌和无铁供应显著增加了苧麻体内镉积累量,无锌供应时镉积累量达最大值。锌、铁对苧麻转运镉产生抑制效应,与对照相比,无锌和无铁供应时苧麻根-叶和根-茎的转运系数增加了4%~24%,锌、铁缺失加剧镉从苧麻地下部向地上部转运。

关键词:苧麻;镉吸收;锌;铁;转运

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)02-0283-05 doi:10.11654/jaes.2014.02.012

Cadmium Uptake and Transportation in Two Ramie Cultivars Under Zinc and Iron Deficiency

SHE Wei, CUI Guo-xian*, ZHAO Dan-bo, XIAO Cheng-xiang

(Institute of Ramie, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

Abstract: Ramie (*Boehmeria nivea*) is a China-originated perennial herb with high biomass and elevated cadmium (Cd) tolerance. Ramie fibers are mainly produced as textile materials, hence minimizing the potential hazard of toxic metals in food chain. This study was carried out in hydroponic conditions to test the effects of Zn and Fe deficiency on Cd concentrations and distribution in two ramie cultivars. Four Zn and/or Fe treatments with Cd level at $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ were used, ①no Zn plus Fe (+Fe-Zn); ②no Fe plus Zn (-Fe+Zn); ③no Fe or Zn (-Fe-Zn); ④CK (+Fe+Zn). Cadmium concentration, translocation and distribution were varied between two ramie cultivars. Compared with the CK, plant height, biomass of stem and leaf, biomass of root for 2 ramie cultivars in Zn and/or Fe deficiency were significantly reduced by 10.24%~21.64%, 1.02%~6%, 2.04%~12.24% respectively ($P<0.05$). Supplying normal Zn and Fe increased the height and biomass of ramie, while Zn and/or Fe-deficient decreased the biomass of ramie. Cadmium concentrations of ramie were roots>stems>leaves. Treatments with Zn or Fe-deficient promoted Cd concentration and accumulation in two ramie cultivars. Zn and/or Fe deficiency increased $\text{TF}_{\text{root to leaf}}$ and $\text{TF}_{\text{root to stem}}$.

Keywords: ramie; Cd concentration; Zn; Fe; transportation

镉是环境中毒性、迁移性最强的重金属元素之一,容易被植物地上部吸收和积累。镉离子在体内的转运是植物富集镉的一个重要原因,然而这个转运过程至今没有得到系统的解释^[1]。有研究者认为富集能力是一种从根到茎的金属转运途径演化的结果^[2]。关

于镉吸收和转运机制研究,大多集中在高浓度镉处理和超富集植物上^[3-4],近年来,国内外专家不再局限于寻找超富集植物,而把目光转移到对重金属具有耐性、适应性强、分布广泛和生物量高的栽培作物,如玉米(*Zea mays*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、芥菜(*Brassica juncea*)等,研究其在低浓度Cd处理下的吸收和转运特性^[5-6]。

苧麻(*Boehmeria nivea*)属荨麻科苧麻属,是我国特产的重要的纤维用经济作物,生长迅速,根系庞大,生物产量高。近年来的研究指出,苧麻对重金属具有

收稿日期:2013-07-16

基金项目:湖南省自然科学基金(12JJ4026);国家麻类产业技术体系(CARS-19-E20);湖南农业大学作栽青年基金(2011-7)

作者简介:余 玮(1982—),女,湖南慈利人,博士,讲师,从事麻类抗逆栽培与育种研究。E-mail:clregina@163.com

* 通信作者:崔国贤 E-mail:gx-cui@163.com

较强的耐性和积累能力,对广东、广西、湖南、江西等省近 20 个矿区进行野外调查发现土壤镉浓度高达 $789 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 苧麻仍生长良好^[7-9]。盆栽和微区试验结果也表明苧麻耐镉和积累能力较强^[10-11], 是一种较理想的中、轻度重金属污染土壤修复作物^[12]。

锌、铁是植物生长发育过程中必需的微量元素, 锌、铁离子通过共质体途径主动进入植物木质部^[4], 研究表明, 锌、铁对镉的植物吸收可能有拮抗作用, 产生了抑制镉吸收的复合效应^[13], 锌、铁的存在与镉一起竞争植物表面的吸收位点, 从而影响植物组织对镉的吸收。但也有研究表明锌、铁可提高植物对镉的吸收与积累^[14]。相关研究对农作物安全生产意义重大, 由于世界上 1/3 土地缺铁, 如果铁能抑制植物镉吸收, 那么缺铁土壤被镉污染后将给人类带来巨大的危害^[15]。

目前, 锌、铁缺失对苧麻吸收和转运镉的影响尚未见相关报道。本文通过锌、铁缺失下 2 个苧麻品种的生长、体内镉含量和各器官分布, 研究苧麻对镉的吸收、转运与铁、锌的关系, 为镉污染防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试的两个苧麻品种为中苧一号、湘苧三号。2012 年 3 月进行无性繁殖扦插育苗, 30 d 后出苗。

1.2 试验设计

盆栽试验于 2012 年 3 月—2012 年 11 月于湖南农业大学智能温室进行。以珍珠岩为培养基质, 自来水冲洗后装于塑料盆中(内径 $23 \text{ cm} \times 18 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$), 选取长势一致的苧麻扦插苗(约 30 cm)洗去根部所带土壤后移栽。每周浇灌 1/2 的 Hoagland 营养液 500 mL。Hoagland 营养液配方($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)为 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 5.79×10^{-3} , KNO_3 8.02×10^{-3} , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 1.35×10^{-3} , MgSO_4 4.17×10^{-3} , MnSO_4 8.90×10^{-6} , H_3BO_3 4.83×10^{-5} , ZnSO_4 0.94×10^{-6} ,

CuSO_4 0.20×10^{-6} , $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ 0.015×10^{-6} , Fe-EDTA 7.26×10^{-5} , pH 值 6.5 左右(用 NaOH 或 HCl 调节)。

2012 年头麻(4—6 月)预培养, 2012 年二麻出苗 14 d 后开始进行处理, CdCl_2 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 设置锌、铁处理具体如下: ①营养液缺锌(+Fe-Zn); ②营养液缺铁(-Fe-Zn); ③营养液缺铁锌(-Fe-Zn); ④全营养液(+Fe+Zn), 以处理④作对照。每处理各品种重复 3 盆, 每盆 3 株。

1.3 取样与分析

2012 年二麻成熟期(8 月 1 日)和三麻成熟期(11 月 1 日)分别测定株高, 收获整株后用自来水冲洗, 然后用去离子水清洗。植株分为地上部(茎、叶)和地下部, 先 105°C 杀青半小时, 然后在 65°C 烘干至恒重, 研磨、过筛。用硝酸-高氯酸法消化^[16]。在湖南农业大学检测中心使用 SOLAAR M6 型原子吸收光谱仪测定重金属镉含量。镉积累量=植株重金属含量 $\times$ 植株生物量, 转运系数 $\text{TF}_{\text{叶/根}}$ 、 $\text{TF}_{\text{叶/茎}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎/根}}$ 分别表示叶与根、叶与茎以及茎与根中镉含量的比例^[8]。

1.4 数据处理

所用数据为二麻和三麻平均值。采用 SPSS、Excel 等软件处理数据。

2 结果与分析

2.1 锌、铁对苧麻株高和植物生物量的影响

镉处理和锌、铁缺失对苧麻株高和生物量的影响见表 1。由表 1 可以看出, 无锌供应时, 中苧一号和湘苧三号株高比对照(全营养液)分别下降了 13.22% 和 10.24%; 无铁供应时, 中苧一号和湘苧三号株高比对照分别下降 14.37% 和 13.12%; 锌铁同时缺失条件下中苧一号和湘苧三号株高比对照分别下降 21.64% 和 15.91%。中苧一号和湘苧三号的茎叶干重在无锌、无铁以及锌铁同时缺失条件下比对照分别下降了 1.02% 和 3%、2.04% 和 3% 以及 5.1% 和 6%。中苧一号和湘苧三号的根干重在无锌、无铁以及锌铁同时缺失

表 1 苧麻株高和生物量情况
Table 1 Height and biomass of ramie in different treatments

Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	处理	株高/cm		茎叶干重/kg		根干重/kg	
		中苧一号	湘苧三号	中苧一号	湘苧三号	中苧一号	湘苧三号
5	+Fe+Zn	87.20 $\pm$ 3.17b	89.33 $\pm$ 5.50b	0.98 $\pm$ 0.02a	1.00 $\pm$ 0.03a	0.49 $\pm$ 0.04a	0.50 $\pm$ 0.04a
	+Fe-Zn	75.67 $\pm$ 2.66c	80.18 $\pm$ 1.15bc	0.97 $\pm$ 0.05a	0.97 $\pm$ 0.08a	0.47 $\pm$ 0.07a	0.48 $\pm$ 0.04a
	-Fe+Zn	74.67 $\pm$ 1.52c	77.61 $\pm$ 2.64c	0.96 $\pm$ 0.09a	0.97 $\pm$ 0.05a	0.48 $\pm$ 0.05a	0.47 $\pm$ 0.02a
	-Fe-Zn	68.33 $\pm$ 2.23d	75.12 $\pm$ 1.52c	0.93 $\pm$ 0.06b	0.94 $\pm$ 0.02b	0.43 $\pm$ 0.01b	0.45 $\pm$ 0.03ab

注: 同列不同小写字母表示不同处理间差异达 0.05 显著水平($P < 0.05$), 下同。

条件下比对照分别下降了 4.08%和4%、2.04%和 6%以及 12.24%和 10%。结果表明锌、铁能促进镉胁迫下苧麻的生长,提高其株高、茎叶干重和根干重,本实验中锌、铁对镉胁迫下中苧一号株高的影响更大。

2.2 苧麻茎、叶、根中镉含量

镉胁迫下苧麻不同器官之间镉含量有较大差异,茎平均含量 $5.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,叶平均含量为 $4.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,根平均含量 $14.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,呈根>茎>叶的趋势。由图 1 和图 2 可知,不管是中苧一号还是湘苧三号,锌、铁对各器官镉含量的影响较显著。中苧一号无锌供应时,茎、叶、根中镉含量比对照分别增加了 18.20%、21.48%和 14.41%,无铁供应时,茎、叶、根中镉含量比对照增加了 20.06%、18.32%和 6.33%,锌、铁缺失条件下,茎、叶、根中镉含量比对照增加了 16.17%、5.45%和 4.98%。湘苧三号无锌供应时,茎、叶、根中 Cd 含量比对照分别增加了 34.13%、28.05%和 27.04%,无铁供应时,茎、叶、根中镉含量比对照增加了 28.51%、

17.07%和 13.93%,锌、铁缺失条件下,茎、叶、根中镉含量比对照增加了 27.41%、14.32%和 10.65%。结果表明苧麻受到镉污染时,当供锌或供铁不足,苧麻体内能吸收更多的镉,且大部分累积在根部。

2.3 苧麻茎、叶、根中镉积累量

如图 3 所示,中苧一号茎叶和根部镉积累量在无锌供应时达最大值,分别为 4.91 mg 和 7.99 mg,比对照分别增加了 21.84%和 9.73%,无铁供应时茎叶和根部镉积累量相比对照也增加了 20.58%和 1.52%,而锌、铁同时缺失条件下茎叶镉积累量比对照增加了 5.62%,但根部镉积累量反而降低了 7.87%。湘苧三号茎叶和根部镉积累量同样在无锌供应时达到最大值(图 4),分别为 5.05 mg 和 7.44 mg,无锌和无铁供应时茎叶和根部镉积累量比对照均有所增加,而锌、铁缺失条件下根部镉积累量与对照相比降低了 0.5%。说明无锌和无铁供应能显著增加中苧一号镉积累量,而锌、铁同时缺失显著降低其根系镉积累量;对湘苧三号而言,

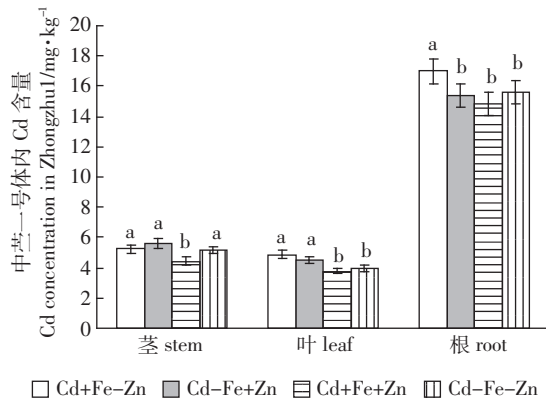


图 1 锌铁缺失对中苧一号各部位镉含量的影响

Figure 1 Effect of zinc and/or iron deficiency on Cd concentrations and distributions of ramie(Zhongzhu No. 1)

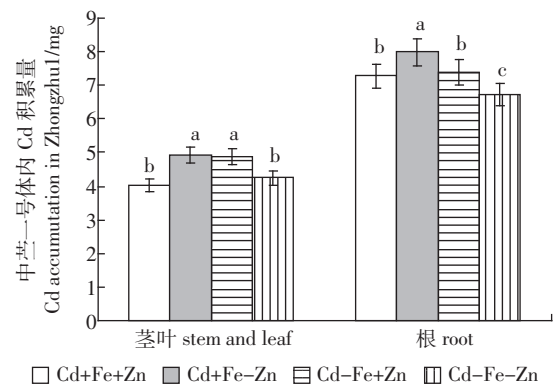


图 3 锌铁缺失对中苧一号各部位镉积累量的影响

Figure 3 Effect of zinc and/or iron deficiency on Cd accumulation of ramie(Zhongzhu No. 1)

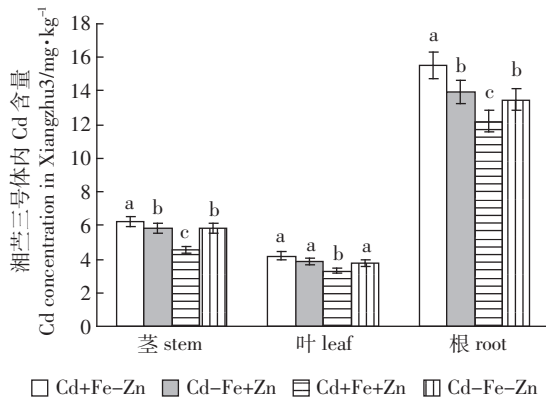


图 2 锌铁缺失对湘苧三号各部位镉含量的影响

Figure 2 Effect of zinc and/or iron deficiency on Cd concentrations and distributions of ramie(Xiangzhu No. 3)

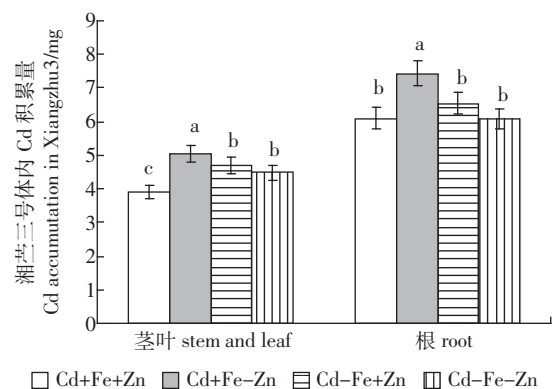


图 4 锌铁缺失对湘苧三号各部位镉积累量的影响

Figure 4 Effect of Zinc and/or iron deficiency on Cd accumulation of ramie(Xiangzhu No. 3)

以上三种处理都能显著增加其茎叶镉积累量。

2.4 锌、铁对苧麻转运系数的影响

表2显示了苧麻不同器官间的转运系数。中苧一号 TF_{叶/根}、TF_{叶/茎}和 TF_{茎/根}在不同处理中分别是 0.25~0.29、0.75~0.93 和 0.29~0.34。湘苧三号 TF_{叶/根}、TF_{叶/茎}和 TF_{茎/根}在不同处理中分别是 0.26~0.28、0.64~0.72 和 0.37~0.43。本实验中缺铁条件下中苧一号和湘苧三号的 TF_{叶/根}和 TF_{茎/根}分别达到最大值,即此时苧麻转运能力最强,比对照增加了 4%~24%;缺锌条件下中苧一号和湘苧三号的 TF_{叶/根}、TF_{茎/根}分别为 0.29、0.27 以及 0.31、0.40,比对照增加了 4%~16%。这一结果表明,锌、铁对镉的转运产生抑制效应,即供应锌、铁可显著降低镉从地下部向地上部的转运,对茎-叶转运系数影响不明显。换言之,当供锌或供铁不足时,加剧镉从苧麻地下部向地上部转运。

表2 不同苧麻品种转运系数(TF)
Table 2 Transfer factor of Cd in two ramie cultivars
in different treatments

处理	TF _{叶/根}		TF _{叶/茎}		TF _{茎/根}	
Treatment	中苧一号	湘苧三号	中苧一号	湘苧三号	中苧一号	湘苧三号
+Fe+Zn	0.25c	0.26b	0.85d	0.67b	0.29c	0.37c
+Fe-Zn	0.29a	0.27ab	0.93a	0.65b	0.31c	0.40b
-Fe+Zn	0.29a	0.28a	0.81b	0.72a	0.36a	0.42a
-Fe-Zn	0.26b	0.28a	0.75c	0.64b	0.34b	0.43a

3 讨论

植物不同部位镉吸收和积累存在着差异,一般是新陈代谢旺盛器官积蓄量最大,而营养贮存器官积蓄量少,镉在植物各部分的分布基本上是:根>叶>枝>花>果实>籽粒^[17],但不同植物体内镉分布不同。苧麻成熟期不同器官中的活细胞的数量和代谢强度差异很大。茎部活细胞数量多,代谢强,因而积累镉能力较强。叶片中的活细胞数量高于茎秆,但叶的生命周期远远短于茎秆,苧麻的生长过程新叶不断代替老叶,收获时的叶生长时间短,含镉量最低,说明叶积累镉的量可能与生长时间呈正相关,对商陆等重金属超富集植物的研究也表明器官中重金属含量随着生长时间延长而增加^[18]。

镉、铁、锌在植物体内存在着复杂的交互作用关系,镉通过必需元素的通道进入植物细胞。Cd²⁺与 Zn²⁺有相同的离子半径,且有相似的化学性质,易竞争植物体内相同的运输通道。Oliver 等^[19]研究表明,锌可以

抑制小麦对镉的吸收,施用锌肥可以使小麦中镉的含量减少约 1/2,裴昕等^[20]报道,龙葵幼苗对锌和镉的吸收存在竞争关系,高浓度镉(200 mol·L⁻¹)可以显著抑制地上部锌积累量;当锌浓度增加到 500 mol·L⁻¹时,植株体内镉积累量呈下降趋势。施锌也可降低烟草、白菜、莴苣和菠菜根部对镉的吸收^[21]。缺铁能促进植物镉吸收积累,可能是缺铁胁迫下植物根系可分泌一种特殊的化合物,此分泌物对镉进入植物体内起到载体作用,因而缺铁可促进植物对镉的吸收^[22];Su 等^[23]通过研究镉胁迫下 12 个大豆栽培种的吸收积累情况发现,缺铁能促进大豆地上部器官积累镉,但降低地下部到地上部的转运系数。本试验中,铁、锌供应情况可以显著影响苧麻对镉的吸收、转运和积累,单一锌或铁缺失都能显著增加苧麻各器官镉浓度和镉积累量,且促进镉从苧麻地下部向地上部转运;而锌、铁同时缺失时虽然中苧一号体内镉含量增加,但其镉积累量反而低于对照。这可能是由于锌、铁同时缺失时中苧一号生长抑制较明显所致,无锌或无铁供应也降低了苧麻生物量,但同时可能减少锌铁对镉吸收的拮抗作用,使得苧麻体内能吸收更多的镉,从而苧麻镉积累量显著增加。

本研究连续两季结果显示,单一锌或铁缺失以及锌铁同时缺失都能促使苧麻吸收镉,这说明苧麻体内镉和铁、锌可能竞争着同样的吸附位点和运输管道。因此,在锌、铁缺失的镉污染土壤上种植苧麻用于原位修复具有一定的可行性和操作性,对重金属植物修复理论具有重要的指导意义。铁、锌缺失影响了苧麻对重金属镉的吸收、积累和转运,但对于单一元素缺失和同时缺失这两种情况而言,二者对苧麻的影响程度和影响机理还有待进一步研究。

4 结论

镉污染(5 mg·kg⁻¹)显著影响苧麻中苧一号和湘苧三号株高和生物量。锌、铁能促进苧麻的生长,对镉胁迫下中苧一号株高的影响更大。苧麻体内镉含量大小依次是根>茎>叶,苧麻积累镉的含量可能与生长时间呈正相关。锌、铁显著影响苧麻镉含量,锌、铁缺失促使苧麻吸收更多的镉,无锌和无铁供应能显著增加苧麻体内镉积累量。锌、铁抑制苧麻体内镉的转运,锌、铁缺失苧麻能将更多的镉从根运输至茎叶。

致谢:感谢湖南农业大学农学院欧阳西荣教授对本文英文摘要的润色。

参考文献:

- [1] Ueno D, Iwashita T, Zhao F J, et al. Characterization of Cd translocation and identification of the Cd form in xylem sap of the Cd-hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*[J]. *Plant Cell Physiol*, 2008, 49:540-548.
- [2] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Mechanisms to cope with arsenic or cadmium excess in plants[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2009, 12:364-372.
- [3] Liu X, Peng K, Wang A, et al. Cadmium accumulation and distribution in populations of *Phytolacca americana* L. and the role of transpiration [J]. *Chemosphere*, 2010, 78:1136-1141.
- [4] Lu L, Tian S, Yang X, et al. Cadmium uptake and xylem loading are active processes in the hyperaccumulator *Sedum alfredii*[J]. *J Plant Physiol*, 2009, 166:579-587.
- [5] Ueno D, Koyama E, Kono I, et al. Identification of a novel major quantitative trait locus controlling distribution of Cd between roots and shoots in rice[J]. *Plant Cell Physiol*, 2009, 50:2223-2233.
- [6] Ueno D, Yamaji N, Kono I, et al. Gene limiting cadmium accumulation in rice[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107:16500-16505.
- [7] 雷 梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2005, 25(5):1146-1151.
LEI Mei, YUE Qing-ling, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5):1146-1151.
- [8] 余 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 湖南冷水江锑矿区苧麻对重金属的吸收和富集特性[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):91-96.
SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Uptake and accumulation of heavy metal by Ramie(*Boehmeria nivea*) growing on antimony mining area in Lengshuijiang City of Hunan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):91-96.
- [9] Yang B, Zhou M, Shu W S, et al. Constitutional tolerance to heavy metals of a fiber crop, ramie(*Boehmeria nivea*), and its potential usage[J]. *Environmental pollution*, 2010, 158(2):551-558.
- [10] 曹德菊, 王光宇, 汪 琰, 等. 安徽铜陵矿区优势植物的重金属富集特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6):1079-1082.
CAO De-ju, WANG Guang-yu, WANG Yan, et al. Accumulation of heavy metals in dominant plants growing on mineral areas in Anhui Tongling[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6):1079-1082.
- [11] 余 玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 苧麻耐镉品种差异及其筛选指标分析[J]. 作物学报, 2011, 37(2):348-354.
SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Comparison and screening indicators for Ramie(*Boehmeria nivea*) genotypes tolerant to cadmium[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2):348-354.
- [12] 赖发英, 叶青华, 涂淑萍, 等. 重金属污染地区的植物调查与研究. 江西农业大学学报, 2004, 26(3):455-457.
LAI Fa-ying, YE Qing-hua, TU Shu-ping, et al. Investigation on plants in heavy-metal contaminated area[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2004, 26(3):455-457.
- [13] 李博文, 杨志新, 谢建治. 土壤 Cd Zn Pb 复合污染对植物吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5):908-911.
LI Bo-wen, YANG Zhi-xin, XIE Jian-zhi. Effects of soil compound contamination with cadmium, zinc and lead on adsorption of the metals by rape[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(5):908-911.
- [14] 黄益宗. 镉与磷、锌、铁、钙等元素的交互作用及其生态学效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(2):92-97.
HUANG Yi-zong. Interactions between cadmium and phosphorus, zinc, iron, calcium and their ecological effects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(2):92-97.
- [15] Zuo Y, Zhang F. Soil and crop management strategies to prevent iron deficiency in crops[J]. *Plant Soil*, 2011, 339:83-95.
- [16] 鲁如坤. 土壤农化分析法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Agriculture chemical analysis of soil[M]. Beijing: Chinese Agriculture Technology Press, 2000.
- [17] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
LIAO Zi-ji. Biological effect and environmental chemistry of trace elements[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1993.
- [18] 薛生国. 超积累植物商陆的锰富集机理及其对污染水体的修复潜力[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
XUE Sheng-guo. Mechanism of manganese hyperaccumulation by *Phytolacca Acinosa* and potential for phytoremediation of metal-contaminated waters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [19] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, et al. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain[J]. *Environ Qual*, 1994, 23:705-711.
- [20] 裴 昕, 郭 智, 奥岩松. 镉锌复合污染对龙葵苗期生长和镉锌累积特性的影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(7):1377-1383.
PEI Xin, GUO Zhi, AO Yan-song. Growth and heavy metal accumulation in *Solanum nigrum* L. seedlings with Cd-Zn complex pollution[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(7):1377-1383.
- [21] McKenna I M, Chaney R L, Williams F M. The effect of cadmium and zinc interactions on the accumulation and tissue distribution of zinc and cadmium in lettuce and pinach[J]. *Environmental Pollution*, 1993, 79:113-120.
- [22] 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根表铁氧化物和缺铁根分泌物对水稻吸收镉的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):463-469.
LIU Wen-ju, ZHANG Xi-ke, ZHANG Fu-suo. Effects of iron oxides and root exudates on cadmium uptake by rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4):463-469.
- [23] Su Y, Wang X M, Liu C F, et al. Variation in cadmium accumulation and translocation among peanut cultivars as affected by iron deficiency [J]. *Plant Soil*, 2013, 363:201-213.