

镉胁迫对花生生长和矿质元素吸收的影响

王丽香^{1,2}, 陈虎¹, 郭峰¹, 张欣¹, 范仲学^{1*}, 万书波^{1*}

(1.山东省农业科学院高新技术研究中心/山东省作物遗传改良与生态生理重点实验室, 济南 250100; 2.山东银香伟业集团有限公司土壤改良与植物营养研究中心, 山东 菏泽 274400)

摘要:以鲁花 14 为材料, 采用盆栽的方法, 设置 0.10 (CK)、3.24、7.35、8.38、18.80 mg·kg⁻¹ 5 种土壤镉浓度, 研究了土壤镉胁迫对鲁花 14 生长和籽粒矿质元素吸收的影响。结果表明: 随着镉浓度的增加, 花生叶和茎的干重, 荚果和籽粒重均呈现先增加后降低的趋势, 这几个指标值均在镉浓度为 3.24 mg·kg⁻¹ 时达到峰值, 而镉浓度达到 18.80 mg·kg⁻¹ 时显著低于对照。花生叶、茎、根和籽粒中的镉含量和镉积累量随镉浓度的增加呈持续上升的趋势, 且不同土壤镉浓度间差异极显著。镉胁迫对花生籽粒矿质元素含量的影响不一致, 随着镉浓度的增加, P 元素呈不断下降的趋势, 而 K、Mg、Ca、Fe、Zn 元素呈现先增加后降低的趋势。

关键词: 鲁花 14; 镉; 籽粒; 矿质元素

中图分类号: Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)06-1106-05 doi:10.11654/jaes.2013.06.004

Effects of Cadmium on Peanut Growth and Mineral Nutrient Uptake

WANG Li-xiang^{1,2}, CHEN Hu¹, GUO Feng¹, ZHANG Xin¹, FAN Zhong-xue^{1*}, WAN Shu-bo^{1*}

(1. High-tech Research Center of Shandong Academy of Agricultural Sciences/Shandong Provincial Key Laboratory of Crop Genetic Improvement, Ecology and Physiology, Shandong Province, Jinan 250100, China; 2. Soil Improvement and Plant Nutrition Research Center of Shandong Good Earth Group, Shandong Province, Heze 274400, China)

Abstract: A pot experiment was conducted using Luhua 14 to study the effects of cadmium on growth and mineral nutrient uptake of peanut cultivars. Five different cadmium concentrations were tested [0.10 (CK), 3.24, 7.35, 8.38 and 18.80 mg·kg⁻¹ of soil]. The results showed that the dry weight of leaves, shoots, legumes and grains from Luhua 14 first rose but dropped afterwards when increasing cadmium concentration. Maximum values were obtained for a soil cadmium concentration of 3.24 mg·kg⁻¹, while minimum values were obtained for a soil cadmium concentration of 18.80 mg·kg⁻¹. Cadmium accumulation in leaves, shoots, roots and grains from Luhua 14 increased proportionally with the cadmium concentration applied in soil. The results also showed that applying cadmium had different effects on the mineral nutrient concentration in grains. Phosphorus concentration was gradually reduced over increased cadmium concentrations, while concentrations of potassium, magnesium, calcium, iron and zinc first rose but dropped afterwards when increasing cadmium concentration.

Keywords: peanut (Luhua 14); cadmium; peanut grain; mineral nutrient

近年来, 随着工农业生产的发展, 工业三废排放量增加, 固体废弃物处理不善, 农业自身污染加剧, 农田土壤中有毒重金属含量急剧增加^[1]。这些有毒重金属可能会通过植物吸收经食物链进入人体, 严重

威胁人类健康^[2], 其中镉由于其高移动性和高毒害性备受人们关注, 是对人类最具威胁的主要有毒重金属之一。

镉胁迫条件下植物常会表现出水分和养分的吸收受抑制, 光合强度和呼吸强度下降, 碳水化合物代谢失调及其他一系列生理代谢紊乱, 最终表现出植物生长量、产量的下降和品质的降低^[3-5]。镉还可能通过影响细胞质膜的透性, 从而影响一些营养元素的吸收和积累, 导致植株和籽粒中营养元素(K、P、Mg、Ca、Cu、Fe、Mn、Zn 等)含量和成分的改变, 如在水稻^[6]、小麦^[7]、大麦^[8]、豌豆^[9]上。花生是我国重要的油料作物和出口创汇作物, 在我国油料作物生产中占有举足轻重

收稿日期: 2012-11-26

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-14); 国家科技支撑计划《花生抗灾与节本增效关键技术与示范》(2009BADA8B03); 山东省自主创新成果转化重大专项“花生产业标准化技术体系规模化应用及其精深加工产品开发”(2012ZHZX1A0418)

作者简介: 王丽香(1984—), 女, 山西太原人, 硕士, 研究方向为逆境生理生化。

* 通信作者: 范仲学 E-mail: fzhongxue@163.com;
万书波 E-mail: wansb@saas.ac.cn

的地位。近年来,有关花生籽粒中镉含量超标的问题日益突出,陈虎等^[9]对山东花生主产区 58 个地块进行了土壤及花生籽粒镉含量的调查,结果表明,在土壤镉含量较低的水平(平均为 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)下,花生籽粒镉含量较高(平均为 $0.140 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且认为食用镉浓度超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的花生会对人体膳食健康有一定的风险。花生籽粒较高的镉富集率致使我国花生出口创汇能力受到了严重影响^[10]。镉对花生生长的影响已有大量报道,但其对籽粒中镉及矿质元素的影响鲜有报道。本研究选择鲁花 14 为供试材料,研究了镉胁迫下花生生长情况、镉吸收积累以及籽粒中 K、P、Mg、Ca、Fe、Zn 等矿质元素含量的变化,旨在说明不同镉浓度下花生营养生长及产量的情况,并论述不同镉浓度下的矿质元素变化,为人类花生膳食的摄入提供参考依据,为花生安全生产提供指导思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试花生品种为鲁花 14,由山东省花生研究所提供。盆栽所用肥料为中东高浓度复合肥料(常州中东化肥有限公司),其 $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 45\%$,未检测出镉。盆栽土壤选用山东省农业科学院实验地耕层土壤(表层 0~20 cm),先将土壤过 1 cm 孔筛备用,镉以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 配置,供试土壤理化性状见表 1。

表 1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the soil

pH(H_2O)	有机质 O.M/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效氮 Available-N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷 Available-P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available-K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	镉 Cadmium/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
7.08	19.5	45.5	17	176	0.10

1.2 试验设计

盆栽试验在山东省农科院试验场进行。土壤镉设 5 个添加浓度,分别为 CK(原始土壤为对照)、3.24、7.35、8.38、18.80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (浓度以 Cd 计),每处理重复 4 次。试验采用泥陶盆(内径 38 cm×高 28 cm),每盆装土 15 kg,将氯化镉(CdCl_2)配制成一定浓度的溶液,均匀喷施在过 1 cm 筛的土样中,每盆施入复合肥 5 g,充分混匀,然后装盆,平衡半个月备用。挑选大小一致的花生种子,每盆“品”字型播种 3 粒。泥陶盆编号并随机排列,置于网室(上覆阳光板防雨)中。花生成熟期大约需要 120 d,出苗后,根据天气情况和土壤持水量情况,每隔一周左右对所有处理花生定量浇水,并且在花生幼

苗期、初花期和荚果膨大期喷施预防病虫害的农药,这样保证每盆收获 3 棵所种花生的果实。

1.3 测定项目及方法

pH 测定采用电位测定法,水土比为 2.5:1,测定仪器为 PHS-3C 型酸度计。

土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法,有效氮测定采用碱解扩散法,有效磷测定采用碳酸氢钠法,速效钾测定采用醋酸铵-火焰光度计法。

花生成熟后,将花生植株分为根、茎、叶、果实 4 部分,分别用自来水、蒸馏水、去离子水冲洗干净。根、茎、叶在烘箱中 105 °C 杀青 30 min,再用 85 °C 烘至恒重后称重(即干重 DW)。

花生荚果自然风干且称重,然后去掉花生壳,称量花生籽粒的重量,花生出仁率=(籽粒重/荚果重)×100%,采用原子吸收光谱仪测定籽粒中 Cd、Ca、Mg、Fe、Zn、K、P 等元素的含量,用石墨炉原子吸收光谱仪测定籽粒中镉含量。

1.4 数据处理

数据的处理统计分析采用 Microsoft Excel 和 SPSS13.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 镉对花生干物质积累量、产量与出仁率的影响

从图 1A 可以看出,镉对花生叶和茎的干物质积累量影响显著。随着镉处理水平增加,花生叶、茎的干重呈现先增后降的趋势,这可能与镉毒害对植物的“低促高抑”现象有关。叶、茎干重在 3.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的镉浓度达到峰值,比对照分别增加了 16.20%、6.11%;而在镉浓度达到 18.80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶、茎干重才显著低于对照,分别降低了 18.17%、24.82%。镉对花生根的干重影响不大,不同镉浓度间差异不显著。

从图 1B 可以看出,随着镉处理水平增加,花生荚果重、籽粒重和出仁率的变化趋势与叶、茎干重相似,均表现出先增加后降低的趋势,且不同镉处理间这三个指标差异显著。荚果重与籽粒重在镉处理水平为 3.24 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达最大值,比对照分别增加 37.87% 和 41.50%,出仁率在 7.35 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为最大值,高于对照 9.25%;而只有在 18.80 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,花生荚果和籽粒重才低于对照。

2.2 镉对花生根、茎、叶、籽粒镉含量与积累量的影响

从图 2A 可以看出,随着镉浓度的增加,花生叶、茎、根和籽粒中的镉含量呈持续上升趋势,不同镉浓度间差异极显著。镉浓度小于 8.38 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,镉在

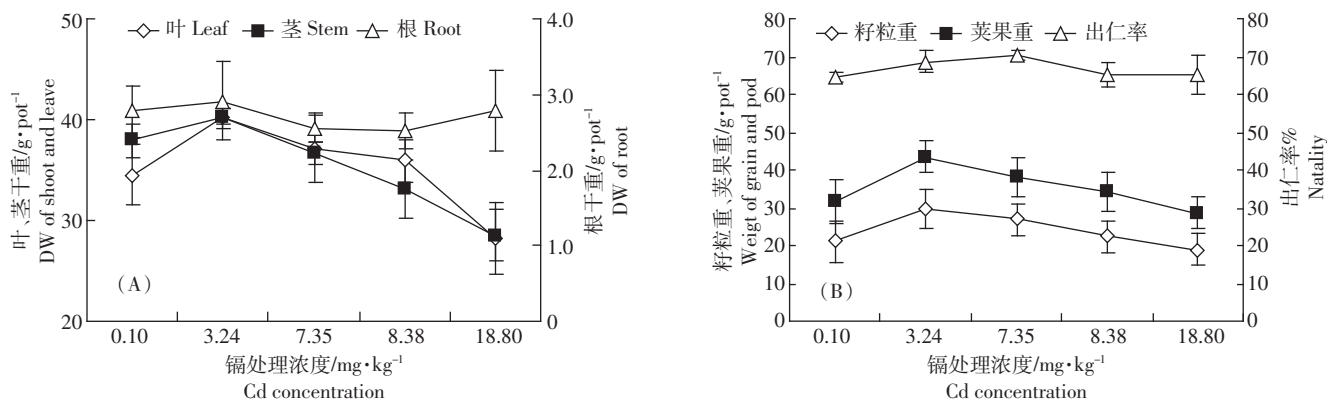


图1 镉对花生干物质积累量(A)、花生产量与出仁率(B)的影响

Figure 1 Effect of cadmium on dry matter accumulation, grain yield and natality of peanut

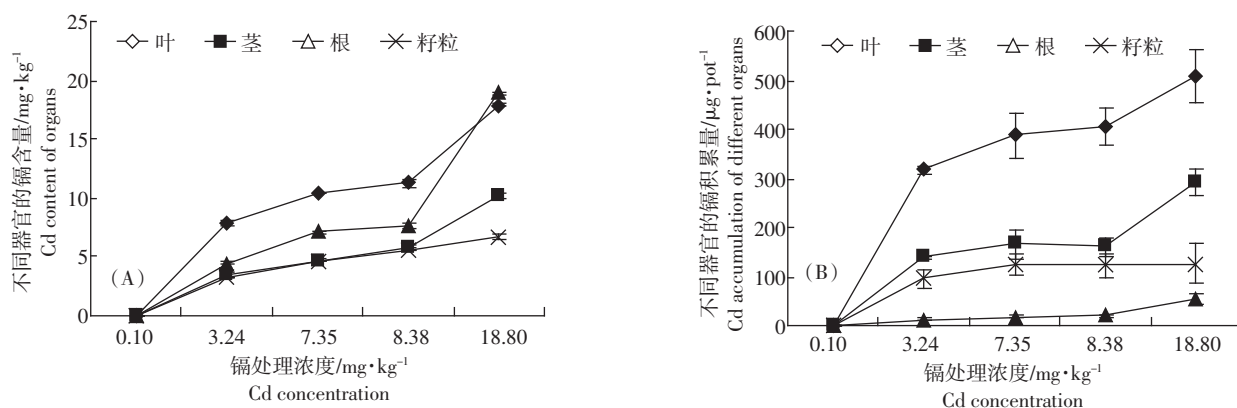


图2 镉对花生根、茎、叶、籽粒中的镉含量(A)与积累量(B)的影响

Figure 2 Effect of cadmium on cadmium content, accumulation of root, shoot, leaves and grain of peanut

不同器官中含量大小为:叶>根>茎>籽粒;高镉浓度($18.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时,镉含量大小为:根>叶>籽粒>茎。花生不同器官的镉积累量也随镉浓度的增大而升高,且不同处理间差异显著,其积累量大小在不同镉浓度间均为:叶>茎>籽粒>根(图2B)。

2.3 镉对花生籽粒中Ca、K、Mg、Fe、Zn和P含量的影响

从表2可以看出,镉胁迫对花生籽粒矿质元素含

量的影响基本一致,Ca、K、Mg、Fe和Zn均呈先增加后降低的趋势,而P元素呈不断下降的趋势。K、Ca和Mg元素在镉浓度为 $7.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到峰值,随后随镉浓度的升高有所下降,但仍高于对照;Zn元素也在镉浓度为 $7.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到峰值,随后下降,但其在镉浓度为 $8.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时开始低于对照;Fe元素只有在最高镉浓度($18.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时才低于对照。

3 讨论

镉在我国土壤的卫生标准为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[11],即使达到污染水平,作物产量也不会受到明显影响,但是生态风险依然存在。镉以移动性大、毒性高成为人们最为关注的重金属污染物之一,花生是我国重要的油料作物,目前我国花生面临的主要挑战是黄曲霉毒素污染、农药残留和籽粒镉含量偏高等问题^[9],这些问题已经成为制约我国花生出口的瓶颈。花生籽粒对土壤中镉的富集效率远大于其他作物^[12],故本试验设计不同镉浓度研究花生镉在其体内的分布规律。本研究结

表2 镉处理对花生籽粒中Ca、K、Mg、Fe、Zn和P含量的影响
Table 2 Effect of cadmium on Ca, K, Mg, Fe, Zn and P concentrations in grain of peanut

镉浓度/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cadmium concentration	元素含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ DW) Element concentration					
	Ca	K	Mg	Fe	Zn	P
0.10	40.90d	3.60b	168.23b	41.72c	16.64b	407.12a
3.24	59.42a	3.71ab	188.78ab	58.53a	20.25a	399.67a
7.35	61.94a	4.36a	199.76a	52.78b	22.60a	386.97ab
8.38	53.79b	3.90ab	178.84ab	41.77c	16.07b	362.21b
18.80	48.41c	3.65b	175.44b	34.04d	14.78b	353.91bc

注:表中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。

果表明,随着镉处理水平增加,花生叶和茎的干重,荚果和籽粒重呈现先增后降的趋势,在土壤镉含量为 $3.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到峰值,分别比对照增加了16.20%、6.11%、37.87%和41.50%,在镉浓度达到 $18.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,花生的叶、茎干重、荚果重、籽粒重才显著低于对照。而低浓度镉对花生生长的促进作用,可能和镉对植物的“低促高抑”现象有关,这与前人的研究结果相同^[13-15],说明镉虽然是有毒重金属,但其少量的存在对植物营养生长和产量等方面有益。

本文研究表明, $3.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的镉处理促进了花生干物质积累和花生产量,但花生茎、叶、籽粒的镉含量严重超标。国家标准 GB 15201—1994 对食品镉限量卫生标准要求镉含量不得高于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,未添加镉的土壤中花生籽粒镉含量符合国家标准,但当镉处理水平为 $3.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,其籽粒中镉含量是国家标准的6.4倍。可见,镉污染极具隐蔽性,由此带来的食品安全风险不容忽视。本研究表明,土壤镉含量小于 $8.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,镉在鲁花14不同器官中含量的大小是叶>根>茎>籽粒,这与向丹^[16]的研究结果相似;而与 Kupper 和 Zhang^[17-18]的结果不同,可能是由于供试作物种类及镉的浓度设计不同所致,有研究表明作物的不同品种、不同器官中累积重金属的规律并不一致^[19-21]。由于镉污染土壤花生叶和茎的镉含量较大,不宜再用于饲料或者沤肥,避免其重新进入食物链中。

花生籽粒的矿质元素直接关系到人体摄入的营养均衡问题,当镉胁迫时,各种矿质元素均会发生改变。已有大量研究表明,除 Mg 外(未见报道),Ca^[22]、K^[23]、Fe^[24]、Zn^[25]和 P^[26]均可以降低植物镉的吸收。目前的研究一致认为以上矿质元素阳离子与 Cd²⁺在进入植物根系时存在一定的拮抗作用,这种拮抗作用的程度与植物种类和离子浓度有关。本研究表明,随着镉浓度的增加,花生籽粒中 Ca、K、Mg、Fe 和 Zn 呈先增加后降低的趋势,P 元素却呈不断下降的趋势。其中 K、Ca 和 Mg 元素在高镉浓度时仍高于对照,而 Zn、Fe 元素只在高镉浓度下才低于对照。关于镉污染下植物体内矿质元素先升高后降低的原因,宋正国等^[28]提出了猜想,认为土壤施加一定的镉会与一些矿质元素发生竞争作用从而使矿质元素从土壤颗粒上解析下来,土壤溶液中矿质元素升高使得植物体内矿质元素升高,而当过量的镉存在时,土壤溶液中的镉大量升高,在根系周围与矿质元素发生拮抗作用使植物体内矿质元素的降低。

4 结论

一定镉浓度促进鲁花14的生长和产量,也促进了籽粒中一些矿质元素的吸收利用,但籽粒镉含量却超标严重,由此带来的食品安全问题不可忽视。高镉浓度对花生产生毒害作用,抑制了花生的生长和产量,也抑制了籽粒中一些矿质元素的吸收。随着镉浓度的增加,花生叶、茎、根和籽粒中的镉含量和镉积累量呈持续上升的趋势,不同镉浓度间差异极显著。

参考文献:

- [1] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients—food safety issues[J]. *Field Crops Research*, 1999, 60: 143–163.
- [2] Sponza D, Karaoğlu N. Environmental geochemistry and pollution studies of Alia; A metal industry district[J]. *Environment International*, 2002, 27: 541–553.
- [3] Chien H F, Kao C H. Accumulation of ammonium in rice leaves in response to excess cadmium[J]. *Plant Science*, 2000, 156: 111–115.
- [4] Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice[J]. *Biologic Plantarum*, 2001, 44(1): 117–123.
- [5] Sandalio L M, Dalurzo H C, Gomez M, et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52: 2115–2126.
- [6] 程旺大, 姚海根, 张国平, 等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 528–537.
CHENG Wang-da, YAO Hai-gen, ZHANG Guo-ping, et al. Effect of cadmium on growth and nutrition metabolism in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(3): 528–537.
- [7] ZHANG G P, Fukami M, Sekimoto H. Genotypic differences in effects of cadmium on grown and nutrient compositions in wheat[J]. *Plant Nutr*, 2000, 23(9): 1337–1350.
- [8] 邬飞波, 张国平. 不同镉水平下大麦幼苗生长和镉及养分吸收的品种间差异[J]. 应用生态学报, 2002, 13(12): 1595–1599.
WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Differences between barley cultivars in seedling growth and in uptake of cadmium and nutrients under various Cd levels[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1595–1599.
- [9] 陈虎, 郭峰, 郭笃发, 等. 山东花生主产区花生镉含量与土壤交换性钙含量的关系及其健康风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(10): 1884–1890.
CHEN Hu, GUO Feng, GUO Du-fa, et al. The relationship between cadmium contents of peanut and contents of exchangeable calcium in soil in main production area in Shandong Province and the health risk assessment to human Health[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2012, 31(10): 1884–1890.
- [10] 万书波, 单世华, 李春娟, 等. 我国花生安全生产现状与策略[J]. 花生学报, 2005, 34(1): 1–4.
WAN Shu-bo, SHAN Shi-hua, LI Chun-juan, et al. Safety status and

- development strategy of peanut in China[J]. *Journal of Peanut Science*, 2005, 34(1):1-4.
- [11] 土壤环境质量标准, GB 15618—1995.
- [12] 陈虎, 郭笃发, 郭峰, 等. 作物吸收富集镉研究进展[J]. 中国农学通报, 2013(3):6-11.
- [13] 张丽娜, 宗良纲, 任 恩, 等. 硅对低镉污染水平下水稻幼苗生长及吸收镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):494-499.
ZHANG Li-na, ZONG Liang-gang, REN Cai, et al. Effects of Si on rice seedling growth and uptake of Cd in the low level of Cd pollution[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2007, 26(2):494-499.
- [14] 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.
HUANG Yun-xiang, LIAO Bo-han, XIAO Lang-tao, et al. Effects of Cd²⁺ on seedling growth and phytohormone contents of glycine max[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(7):1398-1401.
- [15] 范仲学, 单世华, 杨志艺, 等. 重金属镉在五类花生不同部位的分布特征及其对产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2009, 11(5):102-107.
FAN Zhong-xue, SHAN Shi-hua, YANG Zhi-yi, et al. Effects of Cd stress on distribution characteristics at different parts of five peanut genotypes and their yields[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2009, 11(5):102-107.
- [16] 向 丹, 焦卫平, 苏德纯. 不同吸镉能力油菜各器官积累镉的差异性[J]. 中国油料作物学报, 2009, 31(1):29-33.
XIANG Dan, JIAO Wei-ping, SU De-chun. Cd accumulation characteristics in organs of rapeseed varieties with different Cd uptake ability [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2009, 31(1):29-33.
- [17] Kupper H, Lombi E, Zhao F J, et al. Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyper-accumulation *Arabidopsis halleri*[J]. *Planta*, 2000, 212(1):75-84.
- [18] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes-differing in Cd tolerance at seedling stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77:93-98.
- [19] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. 农业环境保护, 1996, 15(4):145-149.
Wang K R, Gong H Q. Compared study on the cadmium absorption and distribution of two genotypes rice[J]. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(4):145-149.
- [20] Dunbar K R, McLaughlin M J. The uptake and partitioning of cadmium in two cultivars of potato(*Solanum Tuberosum*)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54:349-354.
- [21] Liu J G, Zhu Q S, Zhang Z J, et al. Variations in Cadmium accumulation among rice cultivars and types and the selection of cultivars for reducing cadmium in the diet[J]. *Journal of Food Science*, 2005, 85:147-153.
- [22] 高 芳, 张佳蕾, 杨传婷, 等. 钙对镉胁迫下花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11):2907-2912.
GAO Fang, ZHANG Jia-lei, YANG Chuan-ting, et al. Effects of applying calcium on peanut physiological characteristics, its yield and kernel quality under cadmium stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11):2907-2912.
- [23] Hart J J, Welch R M, Norvell W A. Transport interaction between Cd and Zn in roots of bread wheat and durum wheat seedlings[J]. *Physiologia plantarum*, 2002, 116(1):173-78.
- [24] 高 超, 王 忆, 马 丽, 等. 不同铁营养状态对小金海棠镉吸收的影响[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(6):83-87.
GAO Chao, WANG Yi, MA Li, et al. Effect of Fe nutrition status on Cd²⁺ influx on root surface of *Malus xiaojinensis*[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(6):83-87.
- [25] Christensen T H. Cadmium soil sorption at low concentrations V1. A model for zinc competition[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1987, 34:305-310.
- [26] 董善辉, 李 军, 赵 梅. 磷对镉污染土壤中水稻吸收积累镉的影响[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(9):39-42.
DONG Shan-hui, LI Jun, ZHAO Mei. Influence of phosphate application on rice absorbing and accumulation of Cd in Cd polluted paddy soil[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9):39-42.
- [27] 宋正国, 徐明岗, 李菊梅, 等. 钙对土壤镉有效性的影响及其机理[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7):1705-1710.
SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, LI Ju-mei, et al. Effects of calcium on cadmium bioavailability in lateritic red soil and related mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7):1705-1710.