

不同基因型甘薯(*Ipomoea batatas* Lam.) 吸收累积 Cd 的特征差异性研究

刘昭兵^{1,2}, 纪雄辉^{1,2}, 田发祥^{1,3}, 彭 华^{1,2}, 吴家梅^{1,3}, 石丽红^{1,2}, 张超凡⁴

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2. 湖南省农业环境研究中心, 长沙 410125; 3. 中南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125; 4. 湖南省作物研究所, 长沙 410125)

摘 要:采用旱地小区试验,研究了 Cd 污染土壤中甘薯吸收累积 Cd 的品种差异,探讨了甘薯吸收累积 Cd 的相关机理。结果表明,甘薯品种间不仅生物量差异较大,对 Cd 的吸收累积能力也不同,8 个品种的地上部茎叶生物量(DW)在 4 594.9~8 232.2 kg·hm⁻²,鲜样 Cd 含量范围为 0.032 9~0.057 4 mg·kg⁻¹;地下部块根生物量(DW)在 7 809.0~14 269.7 kg·hm⁻²,鲜样 Cd 含量范围为 0.002 2~0.011 0 mg·kg⁻¹,茎叶 Cd 含量明显高于块根,但均未超过国家食品中污染物限值标准(GB 2762—2005)(根茎类蔬菜<0.1 mg·kg⁻¹)。而与无公害蔬菜质量标准(GB 18406.1—2001)进行比较(<0.05 mg·kg⁻¹),有 3 个甘薯品种(心香、湘薯 15、泉薯 9 号)的茎叶 Cd 含量超标。因此,轻度 Cd 污染土壤种植的甘薯其茎叶可能存在摄食健康风险,而块根基本无风险,若将 Cd 污染土壤改制种植甘薯,必须妥善处理其地上部茎叶。

关键词:Cd 污染土壤;甘薯;吸收累积 Cd;品种差异

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1653-06

Absorption and Accumulation of Cd in Different Sweet Potato(*Ipomoea batatas* Lam.) Genotypes

LIU Zhao-bing^{1,2}, JI Xiong-hui^{1,2}, TIAN Fa-xiang^{1,3}, PENG Hua^{1,2}, WU Jia-mei^{1,3}, SHI Li-hong^{1,2}, ZHANG Chao-fan⁴

(1.Hunan Soil and Fertilizer Institute, Changsha 410125, China; 2.Hunan Agriculture and Environment Research Center, Changsha 410125, China; 3.Longping Branch of Graduate School of Central South University, Changsha 410125, China; 4.Hunan Crop Research Institute, Changsha 410125, China)

Abstract: Field experiment was adopted to study the differences of Cd absorption and accumulation among different species of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) and its relevant mechanism in Cd polluted soil. The results showed that the differences existed not only in biomass, but also in Cd absorption and accumulation among sweet potato species. Among the eight sweet potato species, their stem and leaf biomass (DW) varied from 4 594.9 kg·hm⁻² to 8 232.2 kg·hm⁻², and their Cd content(FW) varied from 0.032 9 mg·kg⁻¹ to 0.057 4 mg·kg⁻¹; while root biomass(DW) was between 7 809.0 kg·hm⁻² and 14 269.7 kg·hm⁻², and the range of their Cd content(FW) was from 0.002 2 mg·kg⁻¹ to 0.011 0 mg·kg⁻¹. The Cd content in stem and leaf was significantly higher than that in root, but did not exceed the maximum levels of contaminants in the national food safety standard (GB 2762—2005) (<0.1 mg·kg⁻¹). Compared with the safety for pollution-free vegetable (GB 18406.1—2001) (<0.05 mg·kg⁻¹), Cd contents in stem and leaf of three sweet potato species (Xin xiang, Xiang shu No.15, Quan shu No.9) were over standard. Therefore, There is non-feeding health risk of edible roots of sweet potato grown in the mild Cd polluted soil basically, while there may be health risk of stem and leaf of sweet potato by food-chain for feeding. If changing cropping system to plant sweet potato in Cd polluted paddy soil, the stem and leaf of sweet potato should be dealt with properly.

Keywords: Cd polluted soil; sweet potato; Cd absorption and accumulation; species differences

随着我国工业化、城市化的不断推进,农用土壤

遭受重金属污染的风险也与日俱增。已有大量的调查研究表明,我国菜地和农田的镉(Cd)污染现象愈演愈烈,污染地区的农产品安全问题突出^[1-6]。地处湘江流域经济较为发达的长株潭地区,土壤 Cd 的变异系数高达 212%,已达到了严重污染的程度^[7]。Cd 的迁移性较强,易被作物吸收累积^[8],其通过食物链在人体中

收稿日期:2010-03-19

基金项目:国家科技支撑计划项目(2006BAD17B06,2008BAD96B04)

作者简介:刘昭兵(1979—),男,湖南洞口人,硕士,助理研究员,主要从事农业生态环境方面的研究。

E-mail:liuzhaobing_168@yahoo.com.cn

通讯作者:纪雄辉 E-mail:jixionghui@sohu.com

累积可破坏人体骨骼及造血系统,引发贫血、肾损害等^[9]。因此,Cd 被视为人类健康的极大威胁,如何有效阻断其食物链传递途径,一直是该领域的研究热点。对于 Cd 污染土壤的治理,通常可采用改土法、电化法和生物修复等措施。相对来说,工程治理措施往往工程量大,费用高,并且有可能对土壤生态功能造成破坏。采取超富集植物修复矿区重度污染土壤效果明显,但对于轻度污染土壤修复速度较缓。湖南省重金属污染耕地比例较大,但大部分处于中、轻度污染水平,针对我国的人口-耕地矛盾,通过改变种植制度以实现兼顾粮食安全和农产品质量安全的双赢将具有重要的现实意义。

中国是世界上最大的甘薯生产国,甘薯种植面积和总产量分别约占世界的 70%和 85%,而且甘薯品种资源丰富,我国保存的甘薯种质资源约 2 000 份^[10]。甘薯适应性强,生物产量和经济产量高,而且甘薯既可作为粮食作物和饲料作物,也可作为能源作物,通过加工形成乙醇。目前,国内外虽有大量关于不同作物品种资源对 Cd 吸收累积效应的研究报道^[11-17],也有少量涉及甘薯块根 Cd 累积的调查评价^[18-22],但未见甘薯品种间 Cd 累积效应差异的报道。因此,研究不同甘薯品种对污染土壤中 Cd 的吸收累积特征和差异,对于进一步研究中、轻度 Cd 污染土壤下合理利用甘薯进行种植改制和保障农产品质量安全具有重要参考价值。本文选取产量相对较高的 8 个甘薯品种,采用旱地小区试验研究了 Cd 污染土壤中甘薯吸收累积 Cd 的品种差异,并探讨了其吸收累积 Cd 的相关机理,试图为甘薯食品安全生产提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:试验选择在湘潭市岳塘区竹埠村进行(E 112°58'24",N 27°54'55"),试验点距湘江约 0.5 km。该区域属中亚热带季风湿润气候,降雨量充足,年降水量为 1 200~1 500 mm,平均日照时数 1 640~1 700 h,平均气温 16.7~17.4 ℃。土壤为河流冲积物形成的酸性潮土,常年种植蔬菜,地力较均匀。土壤化学性状:pH 4.9,有机质 42.8 g·kg⁻¹,全氮 2.49 g·kg⁻¹,碱解氮 299.0 mg·kg⁻¹,有效磷 26.2 mg·kg⁻¹,速效钾 122.5 mg·kg⁻¹,全量镉 0.57 mg·kg⁻¹。土壤肥力较高,Cd 含量超过国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)二级标准值 0.9 倍(pH<6.5,Cd<0.3 mg·kg⁻¹),属

于轻度污染。

供试作物:8 个甘薯品种均来源于湖南省作物研究所。1 号,SL-19;2 号,徐薯 22;3 号,湘 116;4 号,南 88;5 号,心香;6 号,湘薯 15;7 号,泉薯 9 号;8 号,万紫 56。育苗在湖南省作物研究所栽培基地无污染土壤上进行,2009 年 6 月 20 日移栽,密度为 54 000 株·hm⁻²,11 月 4 日收获。

1.2 试验设计

采用旱地小区试验,每个品种设置 3 个重复,小区面积(7×2=14 m²),随机区组排列,外设保护行。移栽前施用复合肥(NPK 11-11-11)600 kg·hm⁻²,日常管理措施按照当地习惯。

1.3 样品处理

基础土样于甘薯移栽前多点取 0~20 cm 耕层混合样,风干磨细过 20 目和 100 目筛待用。甘薯收获时将块根和茎叶分开,分别测定块根和茎叶生物量。每个试验小区取少量块根和茎叶样品,去除泥土后以自来水洗净,一部分切碎用于水分含量测定,另一部分再以去离子水润洗,样品经杀青烘干后粉碎,过 100 目筛待用。

1.4 分析方法

土壤化学性状及甘薯块根、茎叶的水分含量采用常规方法测定^[18]。土壤全量 Cd 采用 HNO₃-HClO₄-HF 消煮,甘薯块根、茎叶 Cd 采用 HNO₃-HClO₄ 湿法消煮,并带标准物质(GBW07604)进行质量控制。Cd 使用石墨炉原子吸收光谱法测定(ZEEnit 600,德国耶拿公司)。

1.5 数据处理

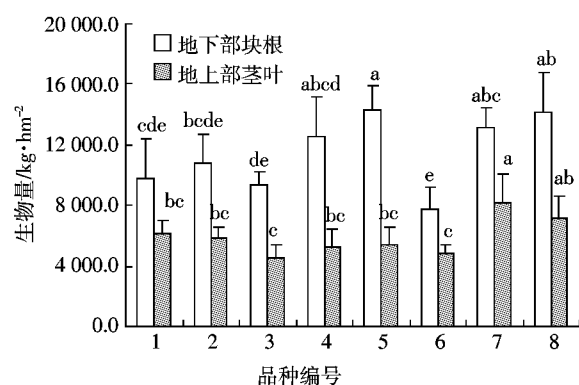
富集系数=植株中 Cd 含量/土壤中 Cd 含量

试验数据为 3 次重复平均值,运用 Excel2003 和 DPS3.0 进行统计和方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同甘薯品种的块根及茎叶生物量差异

由图 1 可以看出,不同甘薯品种其地下部块根和地上部茎叶的生物量差异显著。从地下部块根生物量来看,8 个品种中以 5 号和 8 号的生物量相对较大,6 号的生物量相对较小,其中 5 号和 8 号分别高出 6 号 82.7%($P<0.05$)和 81.4%($P<0.05$)。地上部茎叶的生物量趋势略有不同,7 号和 8 号的生物量相对较大,较 3 号分别高出 79.2%($P<0.05$)和 54.4%($P<0.05$)。总生物量也以 7 号和 8 号相对较大,分别高出 6 号 68.9%($P<0.05$)和 68.5%($P<0.05$)。总体而言,地下部



注:图中同部位不同小写字母代表 LSD 法多重比较差异显著($P < 0.05$),下同。

图1 不同甘薯品种的生物量差异(DW)

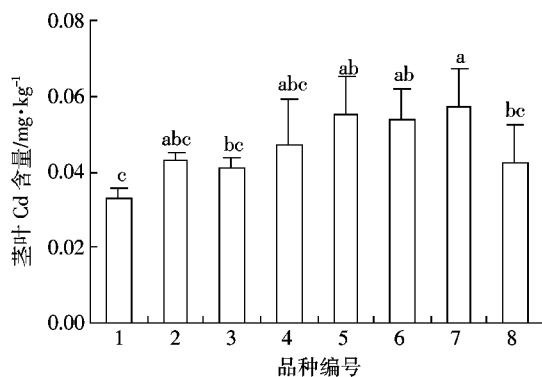
Figure 1 The biomass diversity of different sweet potato species(DW)

块根生物量以5号(心香)最大,而地上部茎叶生物量及总生物量均以7号(泉薯9号)最大。

2.2 甘薯吸收累积 Cd 的品种差异

2.2.1 不同品种的茎叶和块根 Cd 含量

不同甘薯品种的茎叶和块根鲜样 Cd 含量差异



明显,且同品种不同部位的 Cd 含量趋势不同(图2)。茎叶以7号最高,1号最低,7号高出1号74.5%($P < 0.05$);块根以5号最高,3号最低,5号较3号高出394.6%($P < 0.05$)。8个品种的茎叶和块根鲜样 Cd 含量范围分别为 0.032 9~0.057 4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.002 2~0.011 0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均含量分别为 0.046 5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.006 0 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以上结果表明,甘薯茎叶 Cd 含量明显高于块根,但块根 Cd 含量在品种间的差异较茎叶更明显。8个品种中,5号(心香)、6号(湘薯15)和7号(泉薯9号)的茎叶 Cd 含量均在 0.05 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,超过了无公害蔬菜质量标准(GB 18406.1—2001),而块根无超标现象。

2.2.2 不同品种的茎叶和块根 Cd 富集系数

图3为不同甘薯品种的茎叶和块根的干样 Cd 富集系数。从图中可以看出,8个供试品种的茎叶和块根 Cd 富集系数均小于1,说明这些品种的茎叶和块根对土壤中 Cd 均没有明显的富集作用。同品种的茎叶和块根的 Cd 富集系数存在较大差异,基本相差一个数量级,8个供试品种均表现为茎叶对 Cd 的富集作用要大于块根,茎叶 Cd 的富集系数要高出块根

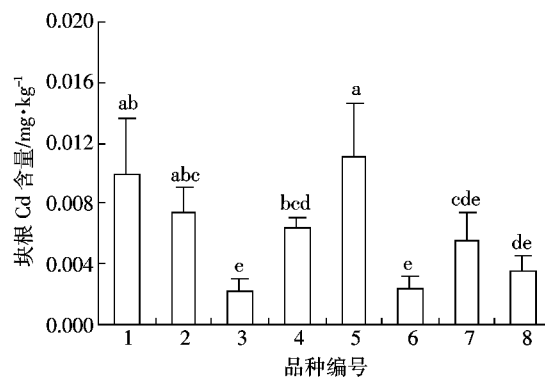


图2 不同甘薯品种的茎叶和块根鲜样 Cd 含量差异

Figure 2 The diversity of Cd content in fresh stem and leaf and root of different sweet potato species

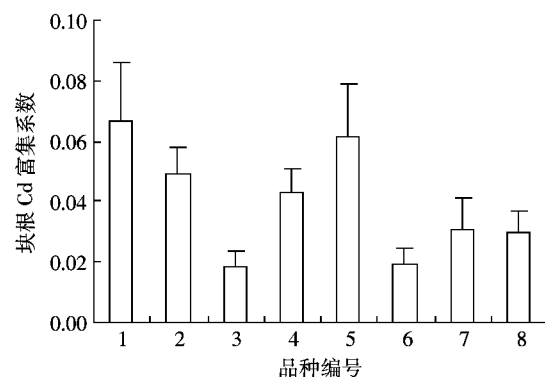
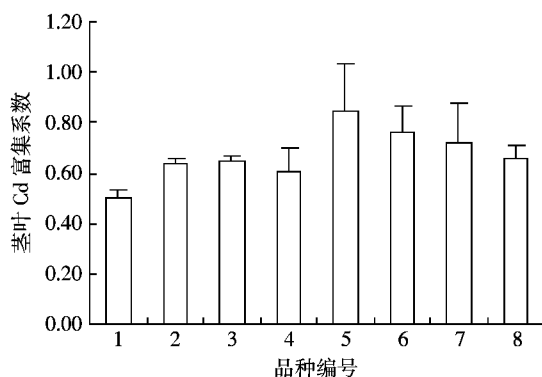


图3 不同甘薯品种的茎叶和块根 Cd 富集系数差异

Figure 3 The diversity of bio-concentration factor of stem and leaf and root in different sweet potato species

6.5~39.2倍。

2.2.3 不同品种的Cd累积量差异

不同甘薯品种的Cd累积量存在明显差异(图4)。8个供试品种中,7号的Cd累积量最高,达到3469.3 mg·hm⁻²,3号最低,为1804.4 mg·hm⁻²,7号高出3号92.3%($P<0.05$)。分析认为,品种间的Cd累积量差异与其生物量及Cd含量密切相关。

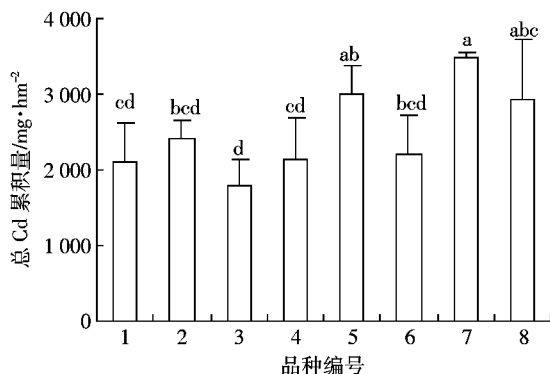


图4 不同甘薯品种的总Cd累积量差异

Figure 4 The diversity of total Cd accumulation in different sweet potato species

2.2.4 不同品种的茎叶与块根Cd含量的比值

图5为不同甘薯品种的茎叶与块根Cd含量的比值。由于甘薯块根对Cd的吸收累积可能存在由茎叶向块根转运的特殊途径,茎叶与块根Cd含量的比值越大,表明Cd越难于由茎叶向块根中转移。8个甘薯品种的茎叶与块根Cd含量的比值为7.5~40.2,平均为21.2。其中3号和6号的比值相对较大,块根Cd含量较低,说明这两个品种的茎叶中Cd难于向块根转移。而1号品种的比值最小,块根Cd含量最高,说明该品种的茎叶中Cd易于向块根转移。可见,品种

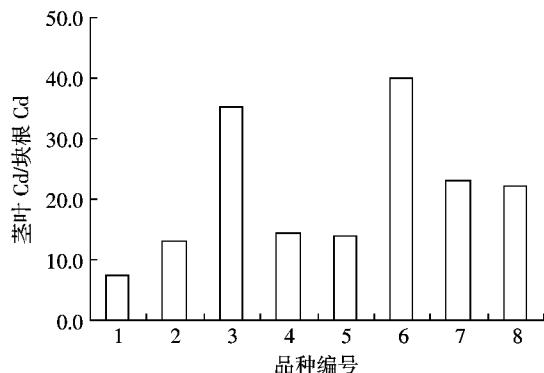


图5 不同甘薯品种的茎叶与块根Cd含量的比值

Figure 5 The ratio of Cd content in stem and leaf to that in root in different sweet potato species

间的这种差异受遗传控制,与其基因型密切相关。

3 讨论

3.1 甘薯吸收累积Cd的机理

甘薯属旋花科,为蔓生性草本植物,也是典型的旱地植物。本试验中,甘薯的地上部茎叶和地下部块根以及同部位不同品种间的Cd含量差异明显(图2),说明甘薯对Cd的吸收累积在品种和部位之间均存在一定规律性。从甘薯的生育过程来分析,甘薯在大田栽培中可分为前期、中期和后期三个生长阶段。前期以根系生长为中心,中期茎叶生长速度快,薯块开始膨大,后期茎叶开始衰退,薯块迅速膨大。由此可见,茎叶中Cd的累积主要来源于整个生长期根系对土壤中Cd的吸收转运。而对茎叶中Cd累积贡献最大的时期可能在生长的中后期,该阶段根系发育完善,茎叶生长已达到顶峰。不同类型根系对茎叶Cd累积的贡献可能也不一样,块根是在生长后期迅速膨大,且数量相对较少,因此纤维根和柴根对茎叶中Cd累积的贡献可能相对较大。

块根中的Cd累积可能来源于两种途径,一方面是直接从土壤中吸收;另一方面是茎叶中Cd转运至块根,因为块根迅速膨大期出现在生长后期,而此时茎叶生长已达到顶峰,由于光合产物开始向块根转移,可能茎叶中部分Cd也随之被转运至块根贮存。而同品种的茎叶Cd含量明显高于块根,表明茎叶对Cd的吸收累积作用较强,但茎叶与块根的Cd含量无明显相关性,也间接证实了上述茎叶和块根的Cd吸收累积机理。因此,甘薯块根中的Cd累积是块根吸收和茎叶转运共同作用的结果,而哪种作用对块根中Cd累积的贡献最大,有待进一步研究证明。甘薯对Cd的吸收累积在不同品种间的差异主要受遗传控制,与其基因型密切相关。

3.2 Cd污染土壤中甘薯的摄食健康风险

鉴于甘薯对土壤中Cd有一定的吸收累积能力,且不同部位和品种间的Cd累积存在较大差异,因此,对于人和动物而言,Cd污染土壤种植的甘薯可能存在摄食健康风险。在轻度Cd污染(0.57 mg·kg⁻¹)条件下,8个供试甘薯品种的茎叶鲜样Cd含量为0.0329~0.0574 mg·kg⁻¹,块根鲜样Cd含量为0.0022~0.0110 mg·kg⁻¹,茎叶Cd含量明显高于块根。根据国家颁布的食品中污染物限量标准(GB 2762—2005),8个甘薯品种的茎叶和块根鲜样Cd含量均未超标(根茎类蔬菜<0.1 mg·kg⁻¹)。但相对于无公害蔬菜质量标准

(GB18406.1—2001)而言,8个甘薯品种中5、6和7号的茎叶鲜样Cd含量超过了限值标准($<0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),超标率为37.5%,其他品种虽未超标,但差异不大,甚至接近超标的临界水平。由此可见,轻度Cd污染土壤种植的甘薯其茎叶对于人和动物存在摄食健康风险,且随着土壤中Cd含量的增加,这种风险也会增加。从块根Cd含量来看,其含量远低于茎叶,均在无公害蔬菜质量标准的限值范围内,说明轻度Cd污染土壤种植的甘薯其块根对人和动物而言基本无摄食健康风险。但在中度或重度Cd污染土壤上的情况如何,尚有待进一步的试验证明。通过比较甘薯不同部位的Cd含量可知,块根的Cd含量远低于茎叶,说明块根的摄食健康风险相对较低。而不同甘薯品种茎叶和块根的摄食健康风险也不同,茎叶以7号最高,1号最低,块根以5号最高,3号最低。由于茎叶对Cd的吸收累积作用明显大于块根,总体而言,甘薯茎叶的摄食健康风险大于块根。因此,在Cd污染土壤上改制种植甘薯,应警惕甘薯茎叶可能存在的Cd暴露危害,必须采取有效措施对其进行处理。

4 结论

不同甘薯品种不仅生物量差异较大,对Cd的吸收累积能力也不同。对于同品种而言,茎叶对Cd的吸收累积能力明显高于块根,因此,茎叶的摄食健康风险相对大于块根。甘薯不同部位的摄食健康风险在品种间也存在差异,茎叶以泉薯9号最高,SL-19最低,块根以心香最高,湘116最低。本试验中8个甘薯品种无论茎叶还是块根,对土壤中Cd均无明显富集作用。且茎叶和块根Cd含量均未超过国家食品中污染物限量标准,但部分品种(心香、湘薯15、泉薯9号)茎叶Cd含量超过了无公害蔬菜质量标准,说明轻度Cd污染土壤种植的甘薯其茎叶存在一定的摄食健康风险,而块根基本无风险。

参考文献:

- [1] 陈桂芬,黄武杰,张丽明,等.南宁市菜地土壤及蔬菜重金属污染状况调查与评价[J].广西农业科学,2004,35(5):389-392.
CHEN Gui-fen, HUANG Wu-jie, ZHANG Li-ming, et al. Survey and evaluation of heavy metal contamination of soils and vegetables in Nan-ning[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2004, 35(5): 389-392.
- [2] 李其林,赵中金,黄 昀.重庆市近郊蔬菜基地土壤和蔬菜中重金属的质量现状[J].重庆环境科学,2000,22(6):33-38.
LI Qi-lin, ZHAO Zhong-jin, HUANG Yun. Present situation of quality in soils and vegetables of the vegetable bases in suburbs of Chongqing[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(6): 33-38.
- [3] 宋 波,陈同斌,郑袁明,等.北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J].环境科学学报,2006,26(8):1343-1353.
SONG Bo, CHEN Tong-bin, ZHENG Yuan-ming, et al. A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1343-1353.
- [4] 王 军,陈振楼,王 初,等.上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J].环境科学,2007,28(3):647-653.
WANG Jun, CHEN Zhen-lou, WANG Chu, et al. Heavy metal content and ecological risk warning assessment of vegetable soils in Chongming island, Shanghai City[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(3): 647-653.
- [5] 陈亚华,黄少华,刘胜环,等.南京地区农田土壤和蔬菜重金属污染状况研究[J].长江流域资源与环境,2006,15(3):356-360.
CHEN Ya-hua, HUANG Shao-hua, LI Sheng-huan, et al. Study of the heavy metal contamination in soils and vegetables in Nanjing area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3): 356-360.
- [6] 刘昭兵,纪雄辉,彭 华,等.不同类型钙化合物对污染土壤水稻吸收累积Cd Pb的影响及机理[J].农业环境科学学报,2010,29(1):78-84.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of calcium compounds on uptake and accumulation of Cd and Pb by rice and its mechanism in polluted soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1): 78-84.
- [7] 龙永珍,戴塔根,邹海洋.长沙、株洲、湘潭地区土壤重金属污染现状及评价[J].地球与环境,2008,36(3):231-236.
LONG Yong-zhen, DAI Ta-gen, ZOU Hai-yang. The status quo and evaluation of heavy metal pollution of soils in the Changsha, Zhuzhou and Xiangtan areas[J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(3): 231-236.
- [8] Ali K P, Pendias H. Trace elements in soil and plant[M]. Florida: Florida CRC Press, 1992.
- [9] 陈英旭.环境学[M].北京:中国环境科学出版社,2005:113-114.
CHEN Ying-xu. *Environmentology*[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2005: 113-114.
- [10] 王克勤,王学武,王家万,等.甘薯生产与加工[M].长沙:湖南科学技术出版社,2004.
WANG Ke-qin, WANG Xue-wu, WANG Jia-wan, et al. Sweet potato production and processing [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2004.
- [11] 贾 彦,张 燕,李花粉.镉在黄瓜和油菜中的运输与分布规律[J].生态学杂志,2008,27(1):117-121.
JIA Yan, ZHANG Yan, LI Hua-fen. Translocation and allocation of cadmium in cucumber and rape seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(1): 117-121.
- [12] 欧阳喜辉,赵玉杰,刘凤枝,等.不同种类蔬菜对土壤镉吸收能力的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(1):67-70.
OUYANG Xi-hui, ZHAO Yu-jie, LIU Feng-zhi, et al. Absorption ability of different types of vegetables for soil Cd in Beijing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 67-70.

- [13] 刘志华, 伊晓云, 王火焰, 等. 不同品种大白菜苗期吸收积累镉的差异研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):987-993.
LIU Zhi-hua, YI Xiao-yun, WANG Huo-yan, et al. Cd accumulation in different Chinese Cabbage seedlings under Cd stress[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):987-993.
- [14] 曹德菊, 周世杯, 项 剑. 苕麻对土壤中镉的耐受和积累效应研究[J]. 中国麻业, 2004, 26(6):272-274.
CAO De-ju, ZHOU Shi-bei, XIANG Jian. Ramie tolerance to Cd in soil and its accumulation effect[J]. *Plant Fibers and Products*, 2004, 26(6):272-274.
- [15] 吴启堂, 陈 卢, 王广寿. 水稻不同品种对Cd吸收累积的差异和机理研究[J]. 生态学报, 1999, 19(1):104-107.
WU Qi-tang, CHENG Lu, WANG Guang-shou. Differences on Cd uptake and accumulation among rice cultivars and its mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1):104-107.
- [16] 李贞霞, 任秀娟, 孙涌栋. 南瓜对镉的吸收积累特性研究[J]. 生态科学, 2006, 25(5):423-425.
LI Zhen-xia, REN Xiu-juan, SUN Yong-dong. Cadmium absorption characteristics of pumpkin[J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(5):423-425.
- [17] 李铭红, 李 侠, 宋瑞生. 受污农田中农作物对重金属镉的富集特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3):675-679.
LI Ming-hong, LI Xia, SONG Rui-sheng. Cadmium accumulation in crops grown in polluted farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(3):675-679.
- [18] Cheng S F, Huang C Y. Accumulation of cadmium uptake from soil in the edible root of root vegetables[J]. *Journal of Environmental Engineering and Management*, 2007, 17(2):137-142.
- [19] Setsuda S, Utsunomiya A, Mori Y. Heavy metal contents of sweet potatoes and soils in Kanagawa Prefecture[J]. *Kanagawa-Ken Eisei Kenyusho Nepo*, 1972, 22(1):143-144.
- [20] 施泽明, 倪师军, 张成江. 成都城郊典型蔬菜中重金属元素的富集特征[J]. 地球与环境, 2006, 34(2):52-56.
SHI Ze-ming, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang. The characteristics of heavy metal enrichment in representative vegetables in Chengdu [J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(2):52-56.
- [21] Cheng S F, Huang C Y. Influence of cadmium on growth of root vegetable and accumulation of cadmium in the edible root[J]. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2006(4, 3):243-252.
- [22] de Araujo B S, de Oliveira J O, Machado S S, et al. Comparative studies of the peroxidases from hairy roots of *Daucus carota*, *Ipomoea batatas* and *Solanum aviculare*[J]. *Plant Science*, 2004, 167:1151-1157.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
LU Ru-kun. Method of analysis in soil and agro-chemistry[J]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 1999.