

小白菜和小青菜对镉、汞、砷的富集效应及影响因素

李雪芳¹, 王林权¹, 尚浩博¹, 侯红², 上官宇先¹, 王文岩¹

(1. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:以小白菜和小青菜为试材, 采用盆栽试验, 研究了镉(Cd)、汞(Hg)和砷(As)3种重金属元素对2种蔬菜生长的影响及其在蔬菜地上部的累积效应, 探讨了土壤重金属总量、有效态含量与蔬菜地上部重金属含量的相关关系以及土壤理化性质对重金属在蔬菜可食部位累积的影响。结果表明: 2种蔬菜地上部干物重与土壤Cd含量呈显著负相关, 土壤Hg、As含量对蔬菜干物重的影响不显著; 小白菜富集3种重金属元素的能力大于小青菜, 3种元素在地上部的富集能力大小顺序为Cd>Hg>As; 土壤Cd总量与地上部Cd含量呈显著正相关, Hg总量与小白菜Hg含量显著正相关、与小青菜Hg含量相关性不显著, As总量与2种蔬菜As含量相关性均不显著; 土壤有效态Cd、As含量与2种蔬菜的Cd、As含量均呈显著的正相关; 土壤有效态Hg与小白菜Hg含量显著相关, 与小青菜Hg含量相关性不显著; 提高土壤pH和有机质含量均显著抑制蔬菜可食部位对Cd的富集, 但对抑制As、Hg累积的影响不显著。

关键词:小白菜; 小青菜; 镉(Cd); 汞(Hg); 砷(As); 理化性质; 富集效应

中图分类号:S 565.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2014)01-0016-06

随着工业化、城市化进程的加快, 大量的重金属进入农田、城市及郊区的土壤, 成为重金属的主要累积场所, 土壤中的重金属可通过“土壤-植物-人”的途径进入人体, 对人类健康产生潜在的威胁^[1-3]。蔬菜是人体必需的各种矿质营养元素的主要来源之一, 与人类日常生活息息相关^[4], 叶菜类蔬菜可食部分对重金属的吸收累积可能是人类摄入重金属的主要途径之一^[5-6], 直接威胁着人体的健康。

目前, 中国受不同程度重金属污染的耕地面积已接近2 000万hm², 约占耕地总面积的1/5^[7], 城郊土壤和蔬菜重金属污染多以镉(Cd)、铅(Pb)元素为主, 部分地区汞(Hg)、砷(As)污染也很严重^[8], Hg和As在我国大部分地区蔬菜中的含量虽未超过国家卫生标准, 但其检出率将近100%, 有许多地方的蔬菜、水果等食物中Cd、As 3种重金属元素含量超标或接近临界值, 一些国家和地区已拒绝进口我国被污染的农副产品。说明重金属元素已经污染蔬菜产地并在环境中积累, 必须引起高度

重视。Cd、As和Hg等被美国国家环保局(usEPA)筛选为环境内分泌干扰物(EDCs)^[9]。Cd是生物积累性剧毒元素, 且有致癌致畸作用^[10], 可导致骨痛病; Hg是神经系统毒物; 长期接触As会引起细胞中毒, 有时会诱发恶性肿瘤。

土壤重金属总量是评价其生物有效性和土壤环境效应的前提^[11], 但重金属在土壤中以不同形式存在, 总量有时并不能很好的预测、评估土壤重金属环境效应及生物有效性^[12]。一般认为对环境产生潜在影响并能被生物吸收利用的是土壤中生物有效性高且理化性质活泼的那部分重金属^[13]。因此, 将重金属的全量、有效态含量及植物中重金属含量结合起来研究, 对全面准确的评估土壤中重金属的生物毒性及其危害效应有重要的理论与实践意义。

该试验以小白菜和小青菜为供试作物, 采用盆栽方法, 研究了西安市郊不同污染程度的菜地土壤上种植的小青菜和小白菜对Cd、Hg和As等重金属吸收累积的效应, 以及影响其吸收累积的主要土壤因素, 以期农产品产地环境质量评价和农田土壤环境基准值的确定提供理论依据, 同时该研究对防止土壤-植物系统的重金属污染、优化蔬菜种植结构、防止食物链污染具有重要的理论意义和实际意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自西安市郊不同地点12个菜地0~20 cm

第一作者简介:李雪芳(1990-), 女, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向为植物营养与污染土壤修复。E-mail: lixuefangzihuan@126.com.

责任作者:王林权(1964-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 教授, 现主要从事植物营养生理与调控及土壤重金属污染与食品安全等研究工作。E-mail: linquanw@nwsuaf.edu.cn.

基金项目:农业科研杰出人才及其创新团队培养计划资助项目。

收稿日期:2013-10-22

表层土壤,理化性质及重金属含量见表1。供试作物为“利丰四季”小白菜,“秦都抗热605”小青菜。

1.2 试验方法

采用土培盆栽试验,按表1将12份供试土壤采回后经自然风干、碾碎,过2 mm筛。装入上口径12 cm、下口径8 cm、高11 cm的塑料盆,每盆土壤重1.6 kg(以干土计),种植前每盆施1.6 g复合肥(15-15-16)、8 g有机

肥,调节水分至最大持水量的80%。平衡1周后,每个土壤样品分别种植小白菜和小青菜2种蔬菜,每个处理3次重复,共72盆。每盆播种20粒蔬菜种子,待菜苗出齐后定植,每盆10株;生长过程中用自来水灌溉,视天气情况调节土壤水分(湿润管理)。生长30 d后,收获地上部植物样品,测定蔬菜的生物量和Cd、Hg和As等3种重金属元素的含量。

表1 供试土壤性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soils

土壤编号 Soil No.	pH	有机质含量 Organic content /g·kg ⁻¹	速效钾含量 Available kalium content /mg·kg ⁻¹	速效磷含量 Available phosphorus content /mg·kg ⁻¹	速效氮含量 Available nitrogen content /mg·kg ⁻¹	镉含量 Cd content /mg·kg ⁻¹	汞含量 Hg content /mg·kg ⁻¹	砷含量 As content /mg·kg ⁻¹
1	7.77	13.10	220.29	16.58	25.35	0.24	0.57	28.39
2	7.48	11.00	524.85	20.63	13.44	0.32	0.40	19.99
3	7.50	11.12	345.21	6.80	10.03	1.05	1.50	25.19
4	7.43	9.95	78.54	16.80	15.21	0.28	0.35	15.65
5	7.55	9.84	526.44	6.20	17.87	0.38	1.13	20.29
6	7.40	8.74	283.07	34.53	11.76	0.26	0.16	25.69
7	7.50	14.00	478.54	11.12	16.33	2.42	2.3103	24.26
8	7.75	10.14	116.08	13.60	17.72	0.29	0.44	12.14
9	7.67	10.96	231.95	13.72	20.01	0.30	0.24	27.23
10	7.66	11.09	218.35	12.92	15.56	0.25	0.26	24.67
11	7.72	12.62	249.42	23.50	23.33	1.23	0.51	26.58
12	7.79	10.78	452.65	7.20	17.64	0.56	1.75	20.72

1.3 项目测定

蔬菜收获后,洗净烘干,测定2种蔬菜地上部的干物重。

Cd全量:土壤样品用王水-高氯酸消解,石墨炉原子吸收分光光度法测定^[14];植物样品用干灰化-石墨炉原子吸收分光光度法测定(GB/T5009.15-2003)。Hg、As全量:土壤用王水-水浴,原子荧光分光光度法测定(GB/T22105.1-2008,GB/T22105.2-2008);植物用硝酸-高氯酸湿法消煮,原子荧光分光光度法测定^[15]。

土壤有效态Cd含量:DTPA浸提-原子吸收分光光度法测定(GB/T5009.15-2003);土壤有效态Hg含量:CaCl₂浸提-原子荧光分光光度法测定^[16];土壤有效态As含量:0.1 mol/L盐酸浸提,原子荧光分光光度法测定^[17]。

土壤基本理化性质^[18];速效K含量用NH₄OAc浸提-火焰光度法测定,速效P含量用NaHCO₃浸提-紫外-可见分光光度法测定,速效N(NH₄⁺+NO₃⁻)含量用KCl浸提-流动分析仪测定;pH用水-CaCl₂溶液浸提,pH计测定;有机质用重铬酸钾-外加热法测定。

表3 不同地点土壤小白菜和小青菜产量

Table 3 Production of *Brassica pekinensis* and *Brassica chinensis* under different field

土壤编号 Soil No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
干物重 Weight of dry matter /g·株 ⁻¹	小白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	0.55±0.05	0.67±0.01	0.25±0.03	0.45±0.11	0.55±0.09	0.59±0.02	0.26±0.01	0.38±0.09	0.34±0.18	0.35±0.08	0.16±0.07	0.36±0.013
	小青菜 <i>Brassica chinensis</i>	0.37±0.05	0.39±0.09	0.37±0.09	0.39±0.11	0.36±0.03	0.35±0.01	0.24±0.05	0.28±0.01	0.34±0.05	0.39±0.09	0.35±0.03	0.33±0.030

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel软件、SPSS等软件进行试验数据的统计检验、相关性分析等。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量对蔬菜产量的影响

土壤中Cd、Hg和As的含量见表1。按照GB15618-1995《土壤环境质量标准》中的二级标准(表2),由表1、2可知,12个菜地土壤中,Cd含量超标的有3个,最大值为二级标准的8倍;Hg含量超标的有4个,最大值为二级标准的4.6倍;As含量超标的有3个,最大值为二级标准的1.14倍;小白菜的干重为0.16~0.67 g/株,小青菜干重为0.24~0.39 g/株。

表2 土壤环境质量二级标准

Table 2 Grade II criterion of soil environmental quality standards mg/kg

pH	镉 Cd	汞 Hg	砷 As
<6.5	0.3	0.3	40
6.5~7.5	0.3	0.5	30
>7.5	0.6	1	25

由表 4 蔬菜地上部干物重与土壤重金属含量的相关关系可知,小白菜和小青菜可食部位的干物质量与土壤 Cd 含量均呈显著负相关关系,线性回归方程分别为 $y=0.502-0.145x(P<0.05)$; $y=0.377-0.048x(P<0.05)$,即 Cd 含量的增加使 2 种蔬菜可食部位的干物重均显著降低。谢惠玲等^[19]研究发现,在高浓度 Cd 胁迫下,植物首先表现出叶、茎黄化,叶片脱落,且植物的株高、叶长、叶宽、茎粗、干物质量等生物量随着 Cd 浓度的升高而明显的下降;在该试验范围内,土壤 Cd 含量的增加会显著降低 2 种蔬菜的干物质量,但从外观上看蔬菜叶片等生长发育正常,未出现黄化、脱落的症状,主要原因是该研究的供试土壤 Cd 含量较低。

由表 4 可知,土壤 Hg 含量与 2 种绿叶蔬菜地上部的干物重相关性均不显著,即在该研究的 Hg 浓度条件下,土壤 Hg 含量对 2 种蔬菜地上部干物重影响不显著。靳萍等^[20]研究发现,小麦种子平均株高、日均增重、平均根长等指标随着 Hg 浓度升高总体呈下降趋势,但在低浓度时上述各指标的下降不明显。彭舒等^[21]研究也认为,Hg 有抑制水稻幼苗生长的作用。

土壤中微量的 As 可刺激植物的生长发育^[22],但过量暴露的 As 则对植物产生危害,引起植物生长、生物性

状等异常变化^[23]。在该试验的研究范围内,土壤 As 含量与小青菜地上部干物重为正相关关系,与小白菜呈负相关,但相关性均不显著。

表 4 蔬菜可食部位干物重与土壤重金属含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between dry weight of two vegetable edible parts and heavy metal contents of soil			
蔬菜种类 Vegetable varieties	镉含量 Cd content	汞含量 Hg content	砷含量 As content
小白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	-0.606 *	-0.375	-0.206
小青菜 <i>Brassica chinensis</i>	-0.653 *	-0.551	0.176

注: ** 表示 0.01 水平下显著相关, * 表示 0.05 水平下显著相关,下同。
Note: ** means significant correlation at 0.01 level, * means significant correlation at 0.05 level, the same below.

2.2 蔬菜对土壤重金属的富集特征

农产品安全质量无公害蔬菜安全要求(GB18406.1-2001)对蔬菜污染进行了评价(镉 0.05 mg/kg,汞 0.01 mg/kg,砷 0.5 mg/kg)。由表 5 可知,部分样地小白菜地上部 Cd 含量超标,小青菜 Cd 含量未超标;而 2 种蔬菜地上部的 Hg、As 含量均未超标。

表 5 蔬菜可食部位重金属含量

Table 5 Heavy metal contents in edible parts of two vegetables

元素 Element	镉 Cd/ $\times 10^{-2}$ mg \cdot kg ⁻¹ FW		汞 Hg/ $\times 10^{-2}$ mg \cdot kg ⁻¹ FW		砷 As/ $\times 10^{-2}$ mg \cdot kg ⁻¹ FW	
	小白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	小青菜 <i>Brassica chinensis</i>	小白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	小青菜 <i>Brassica chinensis</i>	小白菜 <i>Brassica pekinensis</i>	小青菜 <i>Brassica chinensis</i>
1	0.10 \pm 0.03	0.17 \pm 0.01	0.19 \pm 0.02	0.09 \pm 0.00	2.24 \pm 0.59	1.48 \pm 0.04
2	0.96 \pm 0.58	0.44 \pm 0.09	0.16 \pm 0.05	0.09 \pm 0.01	2.28 \pm 0.02	1.56 \pm 0.20
3	4.60 \pm 0.37	2.00 \pm 1.04	0.12 \pm 0.01	0.08 \pm 0.02	3.04 \pm 0.03	2.80 \pm 0.48
4	1.86 \pm 0.34	0.56 \pm 0.01	0.13 \pm 0.02	0.34 \pm 0.31	2.72 \pm 0.46	2.19 \pm 0.20
5	2.19 \pm 0.21	0.92 \pm 0.04	0.14 \pm 0.04	0.41 \pm 0.00	4.71 \pm 0.51	3.28 \pm 0.01
6	0.46 \pm 0.22	0.60 \pm 0.15	0.17 \pm 0.08	0.05 \pm 0.01	1.67 \pm 0.09	1.09 \pm 0.04
7	5.43 \pm 1.96	1.42 \pm 0.51	0.48 \pm 0.35	0.25 \pm 0.12	3.34 \pm 1.29	2.14 \pm 0.03
8	0.82 \pm 0.15	0.62 \pm 0.19	0.13 \pm 0.02	0.15 \pm 0.05	1.39 \pm 0.18	1.33 \pm 0.17
9	0.55 \pm 0.06	0.51 \pm 0.16	0.08 \pm 0.01	0.15 \pm 0.01	2.54 \pm 0.30	2.00 \pm 0.16
10	0.45 \pm 0.01	0.47 \pm 0.21	0.19 \pm 0.10	0.11 \pm 0.00	1.18 \pm 0.10	2.05 \pm 0.23
11	0.41 \pm 0.34	0.86 \pm 0.21	0.12 \pm 0.17	0.13 \pm 0.03	0.94 \pm 0.55	2.05 \pm 0.26
12	0.56 \pm 0.12	0.60 \pm 0.50	0.37 \pm 0.02	0.24 \pm 0.05	4.11 \pm 0.14	1.90 \pm 0.18

为了比较蔬菜对重金属吸收和累积特性的差异,引入富集系数来衡量蔬菜吸收重金属能力的强弱。富集系数定义为蔬菜各部位的重金属含量与相应的土壤重金属含量之比,说明重金属在植物体内的富集情况,富集系数大则吸收能力强,反之则弱。

由图 1 可知,蔬菜可食部位对 Cd、Hg 和 As 3 种元素的吸收富集能力为小白菜大于小青菜。小白菜 Cd 的富集系数为小青菜的 1.71 倍;小白菜 Hg 和 As 的富集系数分别为小青菜的 1.10 倍、1.27 倍。这表明小白菜更易于吸收累积重金属,对污染物比较敏感;而小青菜对污染物的敏感性较差,吸收量小。

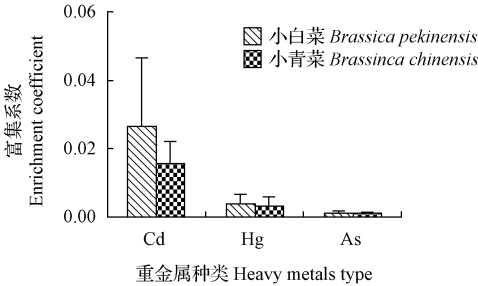


图 1 蔬菜对重金属的富集系数

Fig. 1 Vegetables' enrichment coefficients with heavy metals

对同种蔬菜作物来说,3种重金属元素在可食部位的累积能力不同。2种蔬菜可食部位Cd的富集系数均明显高于Hg,而Hg的富集系数高于As,3种元素的富集能力大小为Cd>Hg>As,即蔬菜对土壤中的Cd最为敏感,Hg次之,对As的敏感性最弱。这与张福金等^[24]的研究结果类似。Cd是植物非必须且已积累的有毒元素,迁移性较强,极易在蔬菜体内累积;而蔬菜可食部位对As的吸收则较少。

2.3 蔬菜-土壤重金属含量的相关性

2.3.1 土壤全量重金属含量与蔬菜体内重金属含量的相关性 土壤重金属含量是蔬菜体内重金属含量的基础,关于土壤-蔬菜重金属含量的相关关系,前人做了大量的研究,但不同学者的研究结果不同,甚至有时会有相反的结论。由表6可知,土壤Cd全量与2种蔬菜可食部位Cd含量均呈显著的正相关关系,即随着土壤Cd含量的增加,蔬菜可食部位积累的Cd也显著增加。土壤Hg含量与小白菜可食部位Hg含量呈显著的正相关关系,而与小青菜可食部位的正相关关系不显著。土壤As含量与2种蔬菜可食部位As含量均无显著相关性。

表6 蔬菜重金属含量与盆栽土壤重金属含量的关系

Table 6 Relationship of heavy metal contents between vegetables and potting soils

蔬菜种类 Vegetable varieties	元素 Elements	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 Significant level
小白菜	全量 Cd	$y=0.0203x+0.0025$	0.758**	显著
Brassica	全量 Hg	$y=0.0013x+0.0009$	0.776**	显著
pekinensis	全量 As	$y=-0.0003x+0.0314$	-0.120	不显著
小青菜	全量 Cd	$y=0.0052x+0.0044$	0.682**	显著
Brassica	全量 Hg	$y=0.0006x+0.0013$	0.364	不显著
chinensis	全量 As	$y=0.00003x+0.0192$	0.026	不显著
小白菜	有效态 Cd	$y=0.046x+0.001$	0.800**	显著
Brassica	有效态 Hg	$y=0.617x-0.002$	0.819*	显著
pekinensis	有效态 As	$y=0.197x+0.009$	0.739**	显著
小青菜	有效态 Cd	$y=0.011x+0.004$	0.697*	显著
Brassica	有效态 Hg	$y=0.184x+0.001$	0.254	显著
chinensis	有效态 As	$y=0.083x+0.013$	0.595*	不显著

2.3.2 土壤有效态重金属含量与蔬菜体内含量的相关性 土壤重金属元素在介质中的存在形态是衡量其环境效应的关键参数,不同形态的重金属表现不同的生物有效性和环境行为。植物对土壤中重金属的吸收,并不仅仅取决于土壤重金属的含量,还与重金属存在形态有关^[25],特别是与重金属的有效态相关。由表6可知,2种蔬菜地上部Cd和As含量与土壤Cd和As有效态含量相关性均达到显著相关水平。而小白菜地上部Hg含量与土壤Hg有效态含量显著相关,小青菜地上部Hg含量与土壤Hg有效态含量间相关性不显著。

有效态重金属元素的生物活性较高,易于转化和迁

移,最容易被农作物吸收利用而进入食物链,从而对环境和人畜造成危害^[26]。除小青菜可食部位Hg含量与土壤Hg有效态含量相关性不显著外,2种蔬菜可食部位重金属含量与土壤重金属有效态含量的相关性均达到显著水平。说明土壤有效态重金属元素是蔬菜可食部位污染元素的主要来源,重金属有效态元素含量更能真实的反应土壤污染程度作物被污染可能性的大小。

2.4 土壤理化性质对蔬菜吸收重金属的影响

2.4.1 土壤有效养分对蔬菜吸收重金属的影响 由表7可知,土壤速效K、速效N含量对3种重金属元素在蔬菜可食部位的累积均没有显著的影响;土壤速效P含量的增加可显著提高Hg在蔬菜可食部位的累积,而显著抑制蔬菜对As的吸收。P和As是同属于元素周期表第五主族的元素,电子层结构相似,在自然界中能形成形态相似的磷酸盐(PO_4^{3-})和砷酸盐(AsO_4^{3-})。国内外许多研究均表明,As可能是通过竞争磷酸盐的转运蛋白而进入植物体内的,P、As在植物吸收转运过程中往往表现出拮抗效应^[27-29]。植物对P和As的吸收是通过相同的通道,是在同一系统中进行的^[30],植物系统中的P会限制对As的吸收和累积,王萍等^[31]的研究结果也表明,供P提高可缓解砷对番茄的胁迫效应。该研究结果表明,土壤速效P含量的增加可显著提高Hg在蔬菜可食部位的累积,对其作用机理有待于进一步研究。

表7 土壤理化性质对蔬菜吸收重金属的影响

Table 7 The effect of the soil physical and chemical properties on the vegetable absorption of heavy metal elements

土壤理化性质 Chemical and physical properties of soil	镉富集系数 Cd enrichment coefficient	汞富集系数 Hg enrichment coefficient	砷富集系数 As enrichment coefficient
速效 K Available kalium	-0.044	-0.545	0.328
速效 P Available phosphorus	-0.25	0.577*	-0.658*
速效 N Available nitrogen	-0.550	-0.184	-0.182
pH	-0.607*	-0.351	-0.180
有机质 Organic matter	-0.605*	-0.557	-0.260

2.4.2 土壤pH对蔬菜吸收重金属的影响 土壤是一个复杂的系统,作物对土壤中重金属元素的吸收,不仅与元素的总量、元素的存在形态等有关,也受pH、有机质等环境因素的影响。

由表7可知,pH与Cd的富集系数均呈显著负相关,即随着pH的增大,Cd的富集系数显著降低;pH与Hg、As的富集系数不相关。土壤pH值是土壤重要的理化参数,对土壤微量元素的有效性和肥力有重要影响^[32],土壤吸附重金属离子受土壤溶液中pH值的强烈影响^[33],土壤pH值的改变可导致土壤中重金属形态的变化,从而影响重金属的生物有效性。pH下降,土壤粘粒矿物和有机质表面的负电荷减少,对重金属的吸附能力下降,从而增加了活性重金属的含量^[34]。该研究表明,pH值的升高会显著抑制Cd在蔬菜可食部位的累积

而对 Hg 和 As 的富集作用影响不显著。

2.4.3 土壤有机质对蔬菜吸收重金属的影响 有机质与 Cd、Hg 和 As 的富集系数均为负相关,其中与 Cd 相关性达到极显著水平。即随着有机质含量的增加,Cd 的富集系数显著降低。土壤有机质含量影响土壤颗粒对重金属吸附能力和重金属的存在形态,有机质含量高的土壤 CEC 较高,它们对重金属的吸附能力高于有机质含量低的土壤,从而增大了重金属从土壤迁移到作物体内的难度。而该研究结果表明,有机质与 Cd 的富集系数呈现显著的负相关性,即随土壤有机质含量的升高,蔬菜对 Cd 的吸收显著受抑制,土壤有机质与 Hg 和 As 富集系数的相关性则不显著。

3 结论

该试验结果表明,供试土壤 Cd 含量与 2 种蔬菜的生物量呈显著的负相关性;土壤 Hg、As 含量与蔬菜干物重间无显著的相关关系。小白菜对 Cd、Hg 和 As 等 3 种元素吸收累积能力大小均大于小青菜,即小白菜对重金属元素的敏感性更强,更易积累有毒物质。3 种重金属元素在蔬菜地上部累积能力不同,Cd 最易被蔬菜吸收,Hg 次之,As 最小。土壤 Cd 全量和 Cd 有效态含量与 2 种蔬菜可食部位的 Cd 含量均呈显著的正相关关系。土壤 As 有效态含量与 2 种蔬菜可食部位的 As 含量均呈显著的正相关性关系。土壤中元素的有效态含量是蔬菜可食部位污染元素的主要来源,更能反映重金属对土壤的污染程度和对作物的潜在影响。土壤速效 P 可抑制蔬菜可食部位对 As 的吸收和富集,而增加对 Hg 的吸收和富集效应。提高土壤 pH 和有机质含量的均能显著降低蔬菜对 Cd 的富集能力,而对 Hg、As 富集效应影响不显著。

在土壤污染环境,不同种类的植物对同种重金属元素的富集能力不同,同一植物种类对不同重金属元素的富集能力也不同。因此根据土壤污染的实际情况,选取适宜的作物种类,因地制宜的进行农业生产,不仅可以防止农产品污染,对污染土壤的治理、修复也有一定的积极意义。

参考文献

- [1] Rajesh K S, Agrawal M, Marshall F M. Heavy metals in vegetables collected from production and market sites of a tropical urban area of India [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009(47):583-591.
- [2] Hao X Z, Zhou D M, Huang D Q, et al. Heavy metal transfer from soil to vegetable in Southern Jiangsu Province, China [J]. Pedosphere, 2009, 19(3):305-311.
- [3] 陈学永,张爱华. 土壤重金属污染及防治方法研究综述 [J]. 污染防治技术, 2013, 26(3):41-44.
- [4] 王小骊,张永志,王钢军,等. 蔬菜中有害重金属元素污染研究进展 [J]. 浙江农业学报, 2004, 16(5):259-262.
- [5] 陈俭霖,史公军. 城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究进展 [J]. 北

方园艺, 2005(3):8-9.

- [6] 孙光闻,朱祝军,方学智,等. 我国蔬菜重金属污染现状及治理措施 [J]. 北方园艺, 2006(2):66-67.
- [7] 王海慧,邹恒福,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.
- [8] 周建利,陈同斌. 我国城郊菜地土壤和蔬菜重金属污染研究现状与展望 [J]. 湖北农学院学报, 2002, 22(5):476-480.
- [9] 张翠,毕春娟,陈振楼,等. 地表水体中重金属类内分泌干扰物的环境行为 [J]. 水资源保护, 2008, 24(2):1-5.
- [10] Moreno C J, Moral R, Perez E A, et al. Cadmium accumulation and distribution in cucumber plant [J]. Plant Nutr, 2000, 23(2):243-250.
- [11] 朱维晃,杨元根,毕华,等. 海南土壤中 Zn、Pb、Cu、Cd 四种重金属含量及其生物有效性的研究 [J]. 矿物学报, 2004, 24(3):239-244.
- [12] Allen H E. Standards for metals should not be based on total concentrations [J]. SETAC Europe News, 1997(8):7-9.
- [13] Tokalioglu S, Kartal S, Elci L. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption after a four-stage sequential extraction procedure [J]. Anal Chim Acta, 2000, 413:33-40.
- [14] 土壤消解方法对比试验研究小组. 王水-高氯酸与氢氟酸-高氯酸消解土壤的方法对比试验 [J]. 农业环境保护, 1998, 7(2):34-36.
- [15] 仲维功,杨杰,陈志德,等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素 Pb、Cd、Hg、As 积累的差异 [J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4):331-338.
- [16] 荆延德,何振立,杨肖娥. 稻麦轮作制下土壤有效态汞提取剂和提取条件研究 [J]. 水土保持通报, 2012, 32(4):185-189.
- [17] 李亮亮,张大庚,李天来,等. 土壤有效态重金属提取剂选择的研究 [J]. 土壤, 2008, 40(5):819-823.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2001.
- [19] 谢惠玲,陈爱萍,张凤英,等. 紫苏对不同浓度镉胁迫的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3):672-675.
- [20] 靳萍,马剑敏,杨柯金,等. Hg 对小麦种子萌发及幼苗生长的影响研究 [J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2002, 30(4):81-84.
- [21] 彭舒,黄真池,欧阳乐军,等. 铜、镉、汞对水稻幼苗抗氧化酶活性的影响 [J]. 湛江师范学院学报, 2012, 33(3):78-85.
- [22] Shaibur M R, Kawai S. Effect of arsenic on visible symptom and arsenic concentration in hydroponic Japanese mustard spinach [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1):65-70.
- [23] Kapusika L A, David E, Yocum J M. Plant toxicity testing to derive ecological soil screening levels for cobalt and nickel [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2006, 25(3):865-874.
- [24] 张福金,姚一萍,崔燕,等. 内蒙古城市土壤-蔬菜系统重金属的富集与评价 [J]. 内蒙古农业科技, 2008(6):4-7.
- [25] 沈志勇. 南京市郊土壤重金属形态特征及生物积累研究 [D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [26] 高硯芳,段增强,邹恒福. 太湖地区温室土壤重金属污染状况调查及评价 [J]. 土壤, 2007, 39(6):910-914.
- [27] 刘全吉,孙学成,胡成效,等. 砷对小麦生长和光合作用特性的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(2):854-859.
- [28] 陈静,方萍. 土壤-植物系统中磷和砷相互作用关系的研究进展 [J]. 四川环境, 2010, 29(6):126-129.
- [29] Pickering I J, Prince R C, George M J, et al. Reduction and coordination of arsenic in Indian mustard [J]. Plant Physiology, 2000, 122(4):1171-1177.
- [30] Tu C, Ma L Q. Effects of arsenic on concentration and distribution of nutrients in the fronds of the arsenic hyper accumulator Pteris vittata L [J]. Environmental Pollution, 2005, 135(2):333-340.
- [31] 王萍,胡江,冉伟,等. 提高供磷可缓解砷对番茄的胁迫作用 [J]. 土壤

学报,2008,45(3):503-509.

[32] 叶华香,张思冲,辛蕊,等. 哈尔滨市城郊菜地土壤重金属及土壤理化性质[J]. 中国农学通报,2011,27(2):162-166.

[33] Elzahabi M, Yong R N. pH influence on sorption characteristics of

heavy metal in the vadose zone[J]. Engineering Geology,2001,60:61-68.

[34] 钟晓兰,周生路,黄明丽,等. 土壤重金属的形态分布及其影响因素[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1266-1273.

The Enrichment Effect of Cd,Hg and As on *Brassica chinensis* and *Brassica pekinensis* and Its Influencing Factors

LI Xue-fang¹, WANG Lin-quan¹, SHANG Hao-bo¹, HOU Hong², SHANGGUAN Yu-xian¹, WANG Wen-yan¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Chinese Academy of Environmental Sciences, Beijing 100021)

Abstract: Taking *Brassica chinensis* and *Brassica pekinensis* as materials, with pot experiment, the effect of Cd, Hg and As on the growth and their enrichment in edible parts of vegetables were studied, the correlation between total content of heavy metal elements and the available content in soil and heavy metal elements contents in edible parts of were discussed and the influence of enrichment of soil physicochemical properties on the heavy metal elements accumulation in edible parts of vegetables were discussed. The results showed that, the above dry matter of the two vegetables were significantly reduced by increasing soil total Cd content, while Hg and As content had no significant influence on above dry matter; The accumulation capacity of heavy metals of *Brassica chinensis* was higher than that of *Brassica pekinensis*, the order of the translocation capacity of different elements was Cd>Hg>As; There was a significant correlation between total Cd content in soil and that of the edible parts of the two kinds of vegetables, and there existed a significantly positive correlation between total Hg content and that of edible parts of *Brassica chinensis*, and no significant correlation with *Brassica pekinensis*, while total As content had no relation to that of edible parts of two vegetables; There were a significant correlation between effective state Cd and As content in soil and that of the edible parts of the two kinds of vegetables; The Hg content in *Brassica chinensis* was significant correlated with effective state As in soil, and was no significant correlation with *Brassica pekinensis*; An increase in the pH values and organic matter content could significantly inhibit the accumulation of Cd of edible parts of the two kinds of vegetables, while it had no remarkable effect on that of Hg and As.

Key words: *Brassica pekinensis*; *Brassica chinensis*; Cd; Hg; As; physicochemical property; enrichment effect

《北方园艺》征订启事

《北方园艺》是由黑龙江省农科院主管,黑龙江省园艺学会和黑龙江省农科院主办的以科学研究和技术普及相结合的园艺类综合性中文核心期刊。国内外公开发行。国家标准连续出版物号:ISSN 1001-0009,国内统一连续出版物号:CN 23-1247/S;半月刊,每月15日、30日出版,大16开本,202页内文。每册定价7.0元,国内邮发代号:14-150,国外邮发代号:BM 5011。

本刊现辟有试验研究、研究简报、设施园艺、栽培技术(菜园、果园)、园林花卉、生物技术、植物保护、贮藏保鲜加工、食用菌、中草药、土壤与肥料、新品种选育、产业论坛、专题综述、农业经纬、经验交流等栏目。适合大专院校师生、科研单位技术人员、农技推广人员、园艺作物种植者、农产品经销商等人员参阅。有需要者可从邮局订阅或直接汇款至编辑部订阅。

地 址:哈尔滨市南岗区学府路368号《北方园艺》编辑部

电 话:0451-86674276

邮 编:150086

投稿网址:bfyy.haasep.cn