

污灌区土壤-蔬菜系统中镉的生物有效性及迁移特征

艾建超¹, 李 宁^{1,2}, 王 宁^{1*}

(1.东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; 2.辽宁省丹东市第一中学, 丹东 118000)

摘要:以北方城市污灌区——长春市季家和四间房为例,采用“五步提取法”分析了受污染土壤 Cd 的赋存形态与生物有效性的关系,通过计算 Cd 在土壤和蔬菜中的富集系数和迁移系数,探讨 Cd 在北方污灌区土壤-蔬菜系统中的污染和迁移特征。研究表明:污灌区土壤耕作层中 Cd 的形态特征为可交换态>铁锰氧化态>碳酸盐结合态或有机结合态>残渣态,季家和四间房污灌区土壤 Cd 的迁移系数为 0.367、0.651;污灌区土壤镉含量超标,蔬菜各部位镉含量分布特征呈现根>茎>果实的规律;季家和四间房白菜都是土壤-根富集系数>茎-叶迁移系数,Cd 主要在根部富集;季家西红柿茎-叶迁移系数最高,而四间房西红柿的土壤-根富集系数最高;四间房白菜、西红柿土壤-根的富集系数均高于季家蔬菜,这与四间房土壤活性态 Cd 含量较高有关,且含量越高,蔬菜吸收量越大。

关键词:污灌区;土壤;蔬菜;Cd 形态;五步提取法

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)03-0491-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.03.013

The Bioavailability and Migration Characteristics of Cadmium in Soil-Vegetable System in Sewage Irrigation District

AI Jian-chao¹, LI Ning^{1,2}, WANG Ning^{1*}

(1.School of Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2.The First Middle School of Dandong City, Dandong 118000, China)

Abstract: This article choose the northern city Changchun as the study area, using five-step extraction method to discuss the relationship between Cd fractions and bioavailability, calculating the migration coefficient and enrichment factor of Cd, and discussing the migration characteristics of cadmium in soil-vegetable system in sewage irrigation district. The research has shown that: the Cd fractions in soil mainly exists in the state of Cd exchangeable fraction>Cd ferric-manganese oxidation fraction>Carbonate-bound or bound to organic Cd fraction>residual Cd fraction, the Cd coefficient migration of Jijia and Sijianfang are 0.367 and 0.651, the sewage irrigation district excessive the national standard value of cadmium, the cadmium content distribution characteristics presented the law of root>leaf>stem>fruit; Jijia and Sijianfang shows the same feature: soil-root enrichment coefficient>stem-leaves migration coefficient, Cd was mainly enriched in the roots; the migration coefficient of Jijia tomato stems-leaves is the highest, while the soil-root enrichment factor of Sijianfang is the highest; the soil-root enrichment factor of Sijianfang cabbage, tomatoes is higher than the Jijia vegetables, because of the active form Cd is higher than Jijia, the higher the content in soil, the larger the absorption by vegetables.

Keywords: sewage irrigation; the soil; vegetables; Cd form; five-step extraction method

我国北方城市有多年的污灌历史。污水灌溉作为一项节水技术,在利用污水中营养物质提高土壤肥力的同时,重金属成分也在土壤中富集,并可通过农作物种植进入食物链,从而对人体健康造成严重威胁。

重金属的毒性作用不仅与剂量相关,在进入土壤环境后其活性的高低更大程度上取决于它们的化学形态,重金属的生物有效性及其风险主要取决于其有效态含量。因此,研究重金属元素的形态特别是有效态,对揭示土壤重金属迁移规律及其生物毒害作用具有更实际的意义。近年来,我国学者围绕污灌区土壤和农作物中重金属全量^[1]和重金属风险评价^[2]等方面报道逐渐增多,但有关土壤-作物系统重金属迁移特征的研究,尤其是北方重金属有效态镉迁移规律的研究并

收稿日期:2013-01-10

基金项目:长春市科技局发展计划项目(03251810);国家自然科学基金项目(40673059)

作者简介:艾建超(1987—),男,硕士研究生,主要从事重金属污染及评价研究。E-mail:aijc799@nenu.edu.cn

*通信作者:王 宁 E-mail:nwang@nenu.edu.cn

不多见。土壤中镉的存在形态一般划分为可交换态、水溶态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态。土壤中镉的存在形态直接关系到其生物有效性差异,其中,交换态镉生物活性较高,往往可被植物根系直接吸收;有机结合态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合的镉活性相对较低,但它们时刻处于与交换态的转化平衡中,能持续提供镉源,因而对作物吸收镉也有一定的贡献;残留态镉属强结合形态,活性最低,不易被作物吸收^[3]。不同重金属的生物有效性差异很大。袁波等对菜地土壤中铅、镉有效态含量和影响因素以及生物有效性的研究表明:镉的平均生物有效性系数为 25.1%,明显高于铅的平均生物有效性系数(7.7%),说明菜地土壤中的镉更易被蔬菜吸收^[4]。寇士伟等根据盆栽试验,发现根际土壤中 Pb、Cd 以可交换态与碳酸盐结合态为主,占总量的 55%以上^[5]。土壤中添加外源有机酸、EDTA 后,土壤中交换态、碳酸盐结合态含量下降,降低了土壤中有效态 Cd 的含量,进而影响到植物对 Cd 的吸收^[6]。胡宁静对贵溪水田重金属形态进行了测定,土壤中不同重金属元素化学形态分布具有不同的特点: Cd 以离子交换态最高,占 86%,其次为水溶态,占 6.76%。生物可利用系数表明: Cd 的可利用态比例最高,占 93%,具有较高的生态风险^[7]。综上, Cd 在土壤中存在的形态和比例

是决定其对环境及周围生态系统影响的关键因素,因此查清污灌区 Cd 形态分布对了解污灌土壤中 Cd 的迁移特征以及治理 Cd 污染都有积极的意义。

长春市从 20 世纪 70 年代开始使用污水灌溉,目前共有四个污灌区,主要种植水稻和蔬菜,是全市大部分蔬菜和水稻的供应地。因而,污灌区土壤环境质量与农作物产品质量就成为人们关心的焦点。该区域属于东北黑土地地区,土壤中重金属的形态迁移和转化有着特殊的作用,目前未见报道。为了解该地区土壤污染状况和农作物的食用安全,本研究在对整个污灌区调查基础上,选取了长春市污灌区中四间房灌区和季家灌区,采用“五步提取法”测定了土壤 Cd 的形态及蔬菜各部位重金属 Cd 总量,研究了 Cd 在土壤-蔬菜体内的迁移规律,探讨了重金属 Cd 对蔬菜尤其是蔬菜可食用部分的影响,以期为污灌区土壤资源可持续利用和蔬菜的食用安全提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长春市目前共有四个污灌区,分别是西郊的西新水库灌区,西北郊的四间房水库灌区、北郊的季家水库灌区和东北郊的伊通河灌区,灌区具体位置见图 1。



图 1 长春市污灌区分布图

Figure 1 The distribution of sewage irrigation in Changchun

1.2 样品采集及分析

1.2.1 样品采集

季家和四间房污灌区农户主要利用温室大棚种植白菜和西红柿等蔬菜。本研究在四间房和季家蔬菜大棚内分别选取四个采样点(季家1~4#、四间房5~8#),采集0~20 cm表土,同步采集西红柿、白菜等蔬菜样品,并在远离污灌区的长春市南侧新立城水库菜地和德惠无公害蔬菜基地采集土壤和蔬菜作为对照。

土壤样品用四分法采集,剔除杂质和植物残根后自然风干,碾碎过40目尼龙筛,再用四分法取约100 g,于瓷研钵中研磨至过100目尼龙筛,过筛后将样品充分混匀,贮于塑料袋中备用;蔬菜鲜样去除杂质和烂叶,清水洗净并在阴凉处晾干,用减缩法取100 g左右用绞碎机绞碎至均匀,贮于聚乙烯袋中备用;蔬菜干样,将蔬菜鲜样烘干至恒重,于瓷研钵中研磨至过100目尼龙筛,过筛后将样品充分混匀,贮于聚乙烯袋中备用。

1.2.2 样品分析

(1) 土壤 Cd 全量分析

准确称取土样0.2 g左右,加1 mL氢氟酸、5 mL硝酸和2 mL高氯酸浸泡过夜,置于加热板上加热至冒白烟,当白烟冒尽、残渣为灰白色时,加硝酸溶解残渣,然后定容至25 mL,放入加塞试管中保存,用石墨炉原子吸收法测定Cd的含量。同时进行全程序空白实验。

(2) 土壤 Cd 形态分析

李东艳等总结了目前比较常用的重金属的萃取方法,按出现的时间顺序有 Tessier 的五步萃取法、BCR 三步萃取法和水萃取法等^[8]。五步萃取法是 Tessier 在1979年提出的^[9],在研究重金属形态中有广泛的应用^[7,10-11]。本文按照萃取步骤,选用不同的试剂^[12],分别提取土壤中的可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机结合态和残渣态(表1),石墨炉原子吸收法测定各形态Cd的含量。

(3) 蔬菜样品中 Cd 含量的测定

蔬菜中Cd总量的测定方法:称干样品0.5 g,加10 mL硝酸和2 mL高氯酸浸泡过夜,在加热板上硝化至无色透明并冒白烟,冷却后定容至25 mL加塞试管中,石墨炉原子吸收法测定。

土壤和蔬菜样品测定过程中加入质量控制样品,结果表明分析精度达到预期要求,可满足本次研究的需要。数据处理用SPSS软件进行统计检验分析,5%

表1 Tessier 连续提取法 Cd 形态分析方法^[13]

Table 1 Tessier Cd fraction analysis method^[13]

步骤	形态	提取用试剂	反应条件
I	可交换态	MgCl ₂ , pH7.0	25±1 °C恒温连续振荡 1 h
II	碳酸盐结合态	NaOAc, pH5.0	25±1 °C恒温连续振荡 5 h
III	铁锰氧化态	NH ₄ OH, HCl	96±3 °C恒温间歇振荡 6 h
IV	有机结合态	HNO ₃ , H ₂ O ₂	85±2 °C恒温间歇振荡 2 h
		H ₂ O ₂	85±2 °C恒温间歇振荡 3 h
		NH ₄ OAc	25 °C恒温连续振荡 30 min
V	残渣态	HNO ₃ +HClO ₄ +HF	—

水平下LSD多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

1.3 评价方法

1.3.1 单项污染指数

土壤和蔬菜中Cd的污染程度用单项污染指数法进行评价。

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤、蔬菜中*i*类污染物的污染指数; C_i 为实测值,mg·kg⁻¹; S_i 为土壤、蔬菜*i*类污染物标准,mg·kg⁻¹。

当 $P_i < 1$ 时,表示蔬菜未受污染; $P_i > 1$ 时,表示蔬菜受到污染,且 P_i 值越大污染越严重。

1.3.2 重金属生物可利用性

土壤中重金属的生物可利用性用系数*k*来描述,它直观的反映出重金属中的可利用态(可交换态和碳酸盐结合态)在全量中的比重,比值越大,可利用态金属含量就越大,那么重金属被生物利用的几率就越高,它较全量更能衡量环境污染对土壤的冲击,可作为土壤污染的监测指标^[14-15]。

$$k = \frac{\text{可交换态} + \text{碳酸盐结合态}}{\text{全量}} = \frac{F_1 + F_2}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5} \quad (2)$$

式中: F_1 为Cd的可交换态; F_2 为Cd的碳酸盐结合态; F_3 为Cd的铁锰氧化态; F_4 为Cd的有机物结合态; F_5 为Cd的残渣态。

1.3.3 迁移能力

重金属的迁移能力表示植物对土壤中重金属元素有选择性吸收的能力,可以用迁移系数 M_j 表示。迁移系数^[16]的公式如下:

$$M_j = \sum_{i=1}^n \frac{F_{ij}/T_{ij}}{n} \quad (3)$$

式中: M_j 为元素*j*的迁移系数;*i*为被采样土壤; F_{ij} 为元素*j*在土壤*i*中可交换态的含量,mg·kg⁻¹; T_{ij} 为元素*j*在土壤*i*中的全量,mg·kg⁻¹;n为土壤采样点的数量。

2 结果与讨论

2.1 Cd 在土壤中的形态分布

重金属的毒性作用通常并不单纯是剂量与效应的关系,其进入土壤环境后活性的高低更大程度上取决于它们的化学形态。即某一元素在环境中以某种离子或分子存在的实际形式,有可能表现出不同的生物毒性和环境行为。Cd 在土壤中的形态,涉及到它在土壤中的迁移、转化以及对植物的毒性,而且 Cd 在土壤中的形态和各种形态的比例是决定其对环境及周围生态系统影响的关键因素。为了调查 Cd 不同形态在污灌土壤中的分布以及对蔬菜的生物可利用性的影响,根据前面 Tessier“五步提取法”分别测定了季家和四间房蔬菜大棚中采集的土样,其含量和土壤的 pH 值见表 2。

两大污灌区土壤中 Cd 的形态分布有相近的趋势:季家污灌区土壤中 Cd 的形态分布规律为:可交换态>铁锰氧化态>有机结合态>碳酸盐结合态>残渣态;四间房污灌土壤为:可交换态>铁锰氧化态>碳酸盐结合态>有机结合态>残渣态。两大污灌区土壤耕作层中 Cd 交换态含量都是最高的,分别占 Cd 全量的 42.6%和 65.2%,铁锰氧化态、碳酸盐结合态和有机结合态含量也很高,残渣态含量最少。

季家和四间房污灌区土壤中可交换态 Cd 含量很高,这与该区域土壤的 pH 值偏酸性有关。长春市为典型的黑土区,土壤 pH 值一般在 6.0~7.5 之间,但这两大污灌区的土壤 pH 值除 5# 点外,均在 4.55~7.0 之间。土壤酸性会使重金属活性增强,实际上也是增

强了土壤交换态的形态所致。陈怀满等^[17]研究结果表明:当土壤 pH 值从 7.0 降至 4.55,交换态的 Cd 含量增加,碳酸盐结合态的 Cd 含量减少,同时铁锰氧化物结合态的含量降低。两大污灌区土壤的 pH 值符合 Cd 交换态含量增加的条件和规律。另外,季家和四间房两个污灌区周围均分布有工厂,如机车厂和玉米深加工企业等,使污灌水中除了含有大量氮磷营养成分外,还有多种重金属元素未经处理直接排入,这也是造成两大污灌区土壤酸性比较大的原因之一。四间房污灌区土壤酸性强于季家,其土壤中交换态 Cd 含量更高。

2.2 污灌区土壤和蔬菜中 Cd 含量分布

2.2.1 土壤和蔬菜中镉的全量

污灌区 and 对照区土壤中镉含量的分布特征见表 3。单项污染指数评价可知,季家和四间房污灌区土壤镉含量远远超过对照区新立城水库,同时均超过土壤二级标准限值,最大超标 12.13 和 3.87 倍。说明长期污水灌溉造成了土壤环境中 Cd 大量富集,镉污染严重。

表 3 污灌区和对照区土壤中镉的含量

Table 3 The cadmium content of sewage irrigation and control soil

研究区	镉含量范围/ mg·kg ⁻¹	均值/ mg·kg ⁻¹	变异系数	P _t 值	超标倍数
污灌区 季家水库	3.91~4.11	3.94	0.036	13.13	12.13
四间房水库	1.39~1.57	1.46	0.055	4.87	3.87
对照区 新立城水库	<0.01~0.33	0.232	—	0.77	—
地区背景值		0.099			
土壤环境质量二级标准值 (pH≤6.5)GB 15618—1995		0.3			

表 2 根系土壤 pH 值及 Cd 的形态

Table 2 Cd fraction and pH of root soil

采样点	土壤 pH 值	土壤 Cd 的形态/mg·kg ⁻¹				
		可交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化态	有机结合态	残渣态
季家 1#	5.36	1.481 3	0.648 8	0.878 4	0.823 5	0.279 5
季家 2#	5.15	1.380 6	0.401 5	0.926 1	0.759 2	0.302 7
季家 3#	4.86	1.426 5	0.525 1	0.896 9	0.803 3	0.311 0
季家 4#	5.21	1.498 6	0.626 4	0.801 9	0.648 9	0.333 5
季家均值	5.145	1.447	0.550	0.876	0.759	0.307
占全量比例	—	0.426	0.162	0.258	0.223	0.090
四间房 5#	4.27	1.082 9	0.125 6	0.164 5	0.101 0	0.100 4
四间房 6#	5.03	0.898 2	0.165 2	0.150 5	0.113 0	0.095 8
四间房 7#	4.92	0.939 9	0.110 9	0.159 2	0.103 9	0.119 9
四间房 8#	5.55	0.877 9	0.175 8	0.147 8	0.114 9	0.080 0
四间房均值	4.943	0.950	0.144	0.156	0.108	0.099
占全量比例	—	0.652 1	0.099	0.107 2	0.074	0.068

2.2.2 蔬菜中镉的全量

季家和四间房白菜、西红柿样品根、茎、叶和果实中 Cd 的全量分布及污染特征见表 4。

季家和四间房西红柿与白菜样品中,各部位的镉含量远远高于对照区蔬菜的含量,另外,除西红柿果实中镉含量不超标外,根、茎、叶均超过国家标准限值。其中西红柿根部超标最严重,分别超标 14.38 和 44.12 倍,白菜根部超标较大,分别超标0.8 倍和 1 倍,表明长期的污灌环境造成了蔬菜内镉含量的富集。季家西红柿样品镉含量由高到低的规律是:根>叶>茎>果实,四间房西红柿样品镉含量:根>茎>叶>果实;白菜样品中均为如下规律:根>叶。说明蔬菜根部对重金属的敏感性最强,最易富集。这与许多学者的结论相同^[18]。原因是由于根细胞壁中存在大量交换位点,可把重金属离子固定在这些位点上,从而阻止其向地上部分转移^[19]。

2.3 Cd 的生物可利用性和迁移能力

2.3.1 Cd 的生物可利用性和迁移能力计算结果

根据公式(2)和(3)分别得出供试土壤的重金属生物可利用性和迁移系数,见表 5。

土壤重金属生物可利用性和迁移系数可以影响植物对重金属的吸收,也是表征土壤重金属环境行为和生态过程的重要参数之一。郭观林等对哈尔滨污染黑土、海伦污灌土和清洁黑土的研究表明:Cd 生物可利用性和迁移系数分别为 0.55 和 0.375、0.25 和 0.2、0.15 和 0.175^[20]。对比郭观林的研究结果,四间房灌区

Cd 生物可利用性和迁移系数全部超过了哈尔滨污染黑土,表明该污灌区土壤中 Cd 也具有较高的生物可利用性,对蔬菜的风险较大;季家 4 个土壤采样点 Cd 的生物可利用性和迁移系数均稍低于哈尔滨污染黑土,但高于海伦污灌土,镉的迁移能力介于二者之间。由此可见,两大污灌区土壤 Cd 的迁移能力较大,易于被植物吸收和利用,对植物的影响也比较大。

结合表 2、表 4 和表 5 可见,四间房污灌区土壤中 Cd 的交换态和碳酸盐结合态含量比较高,导致其生物的可利用性比较大。然而,从本次对污灌土壤和蔬菜中 Cd 含量的调查和评价可见,两大污灌区白菜的 Cd 含量超过或已接近国家关于食品中镉限量卫生标准,表明已受到污染;西红柿果实中的 Cd 含量还未超标。说明仅以重金属的各种形态含量只能起到表征作用,还需要以生物实际吸收的重金属浓度才能更准确地表示土壤重金属对蔬菜的实际影响。

2.3.2 重金属在蔬菜植株体内各部位的迁移累积

蔬菜对重金属 Cd 的迁移吸收是有选择性的,并且不同部位对 Cd 的吸收能力也是不一致的,因此可以用植物对 Cd 的富集系数和植物各部位间的迁移系数定量衡量重金属在土壤-农作物和农作物各部位间的迁移性能。参考江水英等^[21]的研究结果,采用蔬菜对土壤的富集系数 BCF(蔬菜根中重金属含量/土壤中重金属含量)表示 Cd 在土壤-蔬菜间的迁移性能;迁移系数 TF1(蔬菜茎中重金属含量/根部重金属含量)、TF2(蔬菜叶中重金属含量/茎中重金属含量)、

表 4 蔬菜各部位 Cd 含量分布(mg·kg⁻¹)
Table 4 The distribution of Cd in vegetables(mg·kg⁻¹)

研究区	土壤镉含量	蔬菜样品	蔬菜植株不同部位镉的含量							
			根	<i>Pi</i>	茎	<i>Pi</i>	叶	<i>Pi</i>	果实	<i>Pi</i>
季家	3.94	西红柿	0.769	15.38	0.121	2.42	0.387	7.74	0.03	0.6
		白菜	0.09	1.8	—		0.056	1.12	—	
四间房	1.46	西红柿	2.256	45.12	0.689	13.78	0.39	7.8	0.028	0.56
		白菜	0.1	2	—		0.049	0.98	—	
德惠升阳蔬菜基地	—	白菜					<0.001			
		西红柿					<0.001			
GB 15201—1994 食品(包括粮食、蔬菜、水果等) 中镉限量卫生标准						0.05				

注:表中数据来源于东北师大研究项目、长春农产品质量安全检测中心和长春市环境监测中心站的监测数据

表 5 土壤重金属生物可利用性和可迁移系数
Table 5 Soil bioavailability and migration coefficient

样点	季家 1	季家 2	季家 3	季家 4	四间 5	四间 6	四间 7	四间 8
Cd 生物可利用性(k)	0.518 1	0.472 7	0.492 5	0.543 6	0.767 5	0.747 4	0.732 9	0.754 6
可迁移系数(M)	0.367 4				0.650 8			

TF3(蔬菜果实中重金属含量/茎中重金属含量)分别表示重金属在根-茎、叶-茎、茎-果实间的迁移能力。用累计富集系数 $\beta = \text{BCF} \times \text{TF1} \times \text{TF3}$, 即蔬菜果实中重金属含量/土壤中重金属含量, 表示果实-土壤中的富集系数。

蔬菜各部位的 BCF 和 TF 见表 6。

表 6 蔬菜各部位的富集系数
Table 6 The enrichment factor and migration coefficient of vegetables

研究区	土壤 Cd 含量/ mg·kg ⁻¹	蔬菜 样品	蔬菜植株不同部位镉的 BCF 和 TF				
			BCF	TF1	TF2	TF3	β
季家	3.940	西红柿	0.195	0.158	3.188	0.248	0.008
		白菜	0.023	—	0.014	—	—
四间房	1.460	西红柿	1.545	0.306	0.566	0.046	0.019
		白菜	0.069	—	0.034	—	—

由表 6 可以看出, 两大污灌区土壤-蔬菜根的重金属富集系数均大于土壤-果实的富集系数, 如季家污灌区西红柿, 土壤-根的 BCF 值为 0.195, 而土壤-果实的 β 值仅为 0.008; 白菜土壤-根的 BCF 值为 0.023, 而土壤-果实(叶片)的 β 值仅为 0.014, 表明 Cd 主要在根部富集; 四间房污灌区的土壤-蔬菜根 Cd 的富集系数大于季家, 这是由于四间房土壤中 Cd 交换态比例(0.652)高于季家(0.426), Cd 的迁移能力和生物可利用性较高的缘故。从蔬菜体内重金属的迁移系数分析, 两大污灌区蔬菜中 Cd 的迁移系数呈现茎-叶>根-茎的规律, 季家西红柿茎-叶的迁移系数甚至>1, 为 3.188。这表明 Cd 在茎-叶之间的迁移, 可能并不完全是蔬菜根从土壤中吸收并向上迁移的那部分 Cd, 也包括直接由叶片吸收的部分, 可能与棚栽蔬菜的农药施用方式、空气流通不利等原因有关。

西红柿土壤-果实富集系数很低, 说明有效态 Cd 在进入植物体内还要经过复杂的形态再分配, 至于 Cd 在植物体结构上的分配状况可能与植物体本身的特点和生理特性有关。

3 结论

(1)研究区土壤耕作层中 Cd 的形态分布规律为: 可交换态>铁锰氧化态>有机结合态、碳酸盐结合态>残渣态。土壤偏酸性是导致其交换态含量较高的原因之一。

(2)季家和四间房污灌区土壤和蔬菜中 Cd 不同程度超标, 西红柿和白菜各部位 Cd 含量有如下规

律: 根>叶、茎>果实。土壤-根 Cd 的富集系数最大, 土壤-果实富集系数最小, 说明重金属 Cd 主要在蔬菜的根部富集。

(3)季家和四间房土壤 Cd 的迁移系数分别为 0.367 和 0.651, 高于北方其他污灌土壤, 说明两大污灌区土壤 Cd 的生物可利用性和迁移能力比较强, 对植物吸收 Cd 起到了关键的作用。

参考文献:

- [1] 朱桂芬, 张春燕, 王建玲. 新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 263-268.
ZHU Gui-fen, ZHANG Chun-yan, WANG Jian-ling. Investigation of heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewage-irrigated area in Sizhuangding, Xinxing City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 263-268.
- [2] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2152-2159.
CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2152-2159.
- [3] 陈有鑑, 陶澍, 邓宝山, 等. 不同作物根际环境对土壤重金属形态的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(1): 54-59.
CHEN You-jian, TAO Shu, DENG Bao-shan. Effect of root system on metal fractionation in rhizosphere of contaminated soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 54-59.
- [4] 袁波, 傅瓦利, 蓝家程. 菜地土壤铅、镉有效态与生物有效性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 130-134.
YUAN Bo, FU Wa-li, LAN Jia-cheng. Study on the available and bioavailability of lead and cadmium in soil of vegetable plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5): 130-134.
- [5] 寇士伟, 吴锦标, 谢素, 等. 红薯对 Pb、Cd 的吸收累积特征及根际土壤 Pb、Cd 形态分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(4): 677-683.
KOU Shi-wei, WU Jin-biao, XIE Su. Absorption and accumulation of Pb and Cd in sweet potato and species distribution of Pb and Cd in rhizosphere soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4): 677-683.
- [6] 张海波, 李仰锐, 徐卫红, 等. 有机酸、EDTA 对不同水稻品种 Cd 吸收及土壤 Cd 形态的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2625-2631.
ZHANG Hai-bo, LI Yang-rui, XU Wei-hong. Cd uptake in rice cultivars and Cd fractions in soil treated with organic acids and EDTA[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9): 2625-2631.
- [7] 胡宁静, 李泽琴, 黄朋, 等. 贵溪市污灌水田重金属元素的化学形态分布[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 683-686.
HU Ning-jing, LI Ze-qin, HUANG Peng. Chemical forms of heavy metals in swage-irrigated paddy soil in Guixi City[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2004, 23(4): 683-686.
- [8] 李东艳, Francois M, 任玉芬, 等. 重金属污染土壤萃取方法选择及参数优化[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 189-192.
LI Dong-yan, M. FRANCOIS, REN Yu-fen. Selection of extraction pro-

- cedures and optimization of parameters for the determination of forms of heavy metals in soils[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4):189-192.
- [9] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential ex-traction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-851.
- [10] 彭刚华. 水稻土中重金属 Cd 的形态含量变化[J]. 福建环境, 2002, 19(1):34-35.
- PENG Gang-hua. The content variety of different forms of Cd in paddy soil[J]. *Fujian environment*, 2002, 19(1):34-35.
- [11] 郝汉舟, 靳孟贵, 李瑞敏, 等. 耕地土壤铜、镉、锌形态及生物有效性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1):92-96.
- HAO Han-zhou, JIN Meng-gui, LI Rui-ming. Fractionations and bioavailability of Cu, Cd and Zn in cultivated land[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1):92-96.
- [12] 王 兵, 周 琴, 南忠仁, 等. 干旱区绿洲受污染土壤中 Cd 和 Pb 在油菜中的累积与迁移[J]. 西北农业学报, 2011, 20(3):62-66.
- WANG Bing, ZHOU Qin, NAN Zhong-ren. Accumulation and migration of Cd and Pb in cole grown in the arid oasis soil[J]. *Acta Agricuturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2011, 20(3):62-66.
- [13] 雷 鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. 生态环境, 2007, 16(5):1551-1556.
- LEI Ming, LIAO Bo-han, QIN Pu-feng. Assessment of bioavailability of heavy metal in contaminated soils with chemical fractionation[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(5):1551-1556.
- [14] Adriano D C. Trace Elements in terrestrial environments, biogeochemistry, bioavailability and risks of metals[C]. 20nd Edn. Springer, New York. 2001.
- [15] 潘根兴, 高建芹, 刘世梁, 等. 活化率指示苏南土壤环境中重金属污染冲击初探[J]. 南京农业大学学报, 1999, 22(2):46-49.
- PAN Gen-xing, GAO Jian-qin, LIU Shi-liang, et al. Activity index as an indicator of environmental stress of heavy metal elements on soils in southern Jiangsu, China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1999, 22(2):46-49.
- [16] Maiz I, Arambarri I, Garcia R, et al. Evaluation of heavy metal availability in polluted soils by two sequential extraction procedures using factor analysis[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110(1):3-9.
- [17] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- CHEN Huai-man. Heavy metal contamination in the soil-plant system [M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [18] 黎佳佳, 付庆灵, 吕 意, 等. 辣椒对灰潮土重金属 Cd Pb 污染的反应与矿质元素吸收[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):236-241.
- LI Jia-jia, FU Qing-ling, LÜ Yi, et al. Absorption of heavy metals cadmium, lead and their complex pollution by pepper grown on grey chao soil[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(2):236-241.
- [19] Allan D L, Jarrell W M. Proton and copper absorption by maize and soybean root cell-walls[J]. *Plant Physiology*, 1989, 89(3):823-832.
- [20] 郭观林, 周启星. 污染黑土中重金属的形态分布与生物活性研究[J]. 环境化学, 2005, 24(4):383-388.
- GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Speciation distribution and bioactivity of heavy metals in contaminated phaeozem[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(4):383-388.
- [21] 江水英, 吴声东, 肖化云, 等. 贵溪冶炼厂周边菜园地土壤-辣椒系统中重金属的迁移特征[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(3):628-632.
- JIANG Shui-ying, WU Sheng-dong, XIAO Hua-yun, et al. Characteristics of heavy metal transportation in vegetable soil and capsicum (*Capsicum annuum* L.) system near the Guixi Copper Smeltery[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(3):628-632.