

锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征

郑娜^{1,2}, 王起超^{1*}, 郑冬梅^{1,2}

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 130012 长春; 2. 中国科学院研究生院, 100049 北京)

摘要: 采用对应采样方法研究了葫芦岛锌冶炼厂周围土壤、蔬菜中 Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的含量及其在土壤-蔬菜中的传递, 分析了土壤、蔬菜中重金属的来源. 结果发现锌厂周围土壤、蔬菜受到重金属的严重污染, 蔬菜可食用部分 Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的含量(以鲜重计)最高可分别达到 0.013、5.476、2.852、41.16 和 1.515 mg/kg. 通过转移因子的比较分析, 锌厂周围重金属在土壤-蔬菜中的转移能力为 $Cd > Zn > Cu > Pb > Hg$, 重金属从土壤向蔬菜叶片中的转移能力高于蔬菜的其它器官. 土壤中重金属主要来源于锌厂周围的大气, 蔬菜叶片中的 Pb 可能部分来源于大气, 而汞则主要来源于大气.

关键词: 蔬菜; 重金属; 锌冶炼; 转移因子

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)06-1349-06

Transfer Characteristics of Mercury, Lead, Cadmium, Zinc and Cuprum from Soil to Vegetable Around Zinc Smelting Plant

ZHENG Na^{1,2}, WANG Qi-chao¹, ZHENG Dong-mei^{1,2}

(1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The transfer characteristics of Hg, Pb, Cd, Zn and Cu from soil to vegetables near zinc smelting plant in Huludao City, China were investigated, and the sources of heavy metals in the soil and vegetable were also analyzed. The results indicate that the Hg, Pb, Cd, Zn and Cu contents of vegetables are 0.013, 5.476, 2.852, 41.16 and 1.515 mg/kg (fresh weight), respectively, and the environment around Huludao Zinc Plant are contaminated seriously. The transfer factors (TF) of heavy metals decrease in the order of $Cd > Zn > Cu > Pb > Hg$. The transfer factors of heavy metals from soil to leaves are higher than from soil to other tissues. The heavy metals in soil derive from atmosphere, and the parts of Pb in the leaves of vegetable derive from atmosphere. Uptake of gaseous mercury is the predominant pathway by which mercury accumulates in the vegetable.

Key words: vegetable; heavy metal; zinc smelting; transfer factors

土壤中的重金属被植物根系吸收, 在植物体内运转, 最终积累于植物可食部分. 人群长期摄入含有重金属的食物使重金属在体内积累进而对普通人群造成健康危害. 因此, 重金属在土壤-蔬菜中的传递日益成为全球关注的焦点^[1]. 受污染地区, 尤其是冶炼厂地区的重金属在土壤-植物可食用部分的迁移则更受到重视^[2]. 目前, 国内外许多研究者对单一重金属在土壤-蔬菜中的传递有所研究^[3], 在土壤-粮食中的传递也有报道^[4], 但对土壤-蔬菜系统中多种重金属传递的研究则相对较少. 葫芦岛锌厂是亚洲最大的锌冶炼厂, 生产过程中通过各种途径向环境中排放重金属, 导致锌厂周围的环境受到重金属的严重污染^[5,6]. 本实验采用对应采样的方法, 研究了葫芦岛锌厂周围地区土壤、蔬菜中重金属的含量, 分析了重金属在土壤-蔬菜中的传递, 通过比较重金属的转移因子, 进一步了解了重金属在不同蔬菜中的转移特性, 最终判断锌厂周围土壤、蔬菜的重金属来源.

1 材料与方法

1.1 采样地点

葫芦岛市位于辽宁省西部沿海, 南邻渤海湾, 大陆性季风气候明显, 四季分明, 主导风向冬季以东北风为主, 夏季以西南风为主, 年平均气温在 8.2 ~ 9.2℃, 平均降水量在 560 ~ 630 mm. 葫芦岛市以石油化工、有色冶金、机械造船和能源电力为支柱产业. 葫芦岛锌厂位于葫芦岛市区东南, 东临渤海, 占地面积 80 000 m². 厂区周围地貌复杂, 土地类型多样. 本实验在葫芦岛锌厂周围共布置了 8 个采样点, 采集了蔬菜及其根部土壤. 采样地点见图 1.

1.2 样品的采集

2005-10 采集了 20 种蔬菜样品, 同步采集植物

收稿日期: 2006-08-23; 修订日期: 2006-11-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-437)

作者简介: 郑娜(1978 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污染物环境行为及其控制, E-mail: zhengnalzz@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: wangqichao@mail.neigae.ac.cn

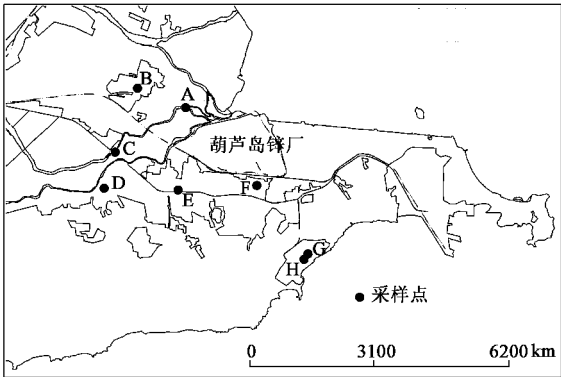


图 1 蔬菜和土壤采样布点

Fig.1 Sampling sites where the vegetable and the soil were sampled

根部耕层土,共计 148 个样品.植物样品在采集当天进行清洗,去除表面和根部的泥土,按根、茎、叶、果实等分割后风干,带到实验室,用不锈钢粉碎机粉碎,过 1.0 mm 塑料筛.土壤样品带回实验室风干,用玛瑙研钵磨碎,过 0.18 mm 塑料筛,以备测定.

1.3 样品分析

蔬菜和土壤样品中汞的测定采用 $V_2O_5-H_2SO_4-HNO_3$ 消化法消解,用 F732-V 智能型冷原子吸收测汞仪(上海华光)测定总汞,铅、镉、锌、铜的测定采用 HNO_3-HClO_4-HF (土壤)和 HNO_3-HClO_4 (蔬菜)消化法消解,用 GBC932AA 型火焰原子吸收-石墨炉(澳大利亚 GBC 科学仪器公司)测定,每个样品取平行样.所测结果通过干重-鲜重的换算关系^[7],确定蔬菜鲜重的重金属含量.分别用土壤环境标准参考样品[GBW 07405(GSS-5)]和植物环境标准参考样品[GBW 07604(GSV-3)]检验,标准物质中汞、铅、镉、锌、铜的测定值在标准值范围之内.

2 结果与分析

2.1 锌厂周围土壤中重金属含量

锌厂周围土壤中重金属含量远高于辽宁省土壤背景值(表 1).本研究以锌厂周围土壤中重金属含量对辽宁省土壤背景值的比值作为土壤重金属的富集因子,土壤中重金属的富集因子分别为: Cd(362) > Zn(39.5) > Hg(34.6) > Pb(14.8) > Cu(8.4),其中 Cd 的富集因子高于其它重金属富集因子 1 个数量级,尽管重金属在土壤中的含量顺序为: Zn > Pb > Cu > Cd > Hg,但土壤中镉的污染最为严重.锌厂周围土壤中的重金属含量远高于国内外地区^[8~10].因此,该地区土壤已经受到重金属的严重污染.

2.2 锌厂周围蔬菜可食用部分重金属含量

表 1 锌厂周围土壤中重金属含量(干重)和
辽宁省土壤背景值及富集因子

Table 1 Contents(dry weight), background, enrichment factor
of heavy metal in soil around the zinc plant

元素	土壤重金属含量 ($n = 17$) ¹⁾ /mg·kg ⁻¹	辽宁省土壤背景 值/mg·kg ⁻¹	富集因子
Hg	1.28 (0.128 ~ 3.79) ²⁾	0.037 (0.013 ~ 0.061)	34.6
Pb	319.6 (83.6 ~ 813)	21.6 (14.8 ~ 28.4)	14.8
Cd	39.2 (2.66 ~ 88.5)	0.108 (0.041 ~ 0.174)	362
Zn	2 507 (238.7 ~ 6 719)	63.5 (41.0 ~ 86.0)	39.5
Cu	165.7 (27.37 ~ 629.4)	19.8 (11.7 ~ 27.9)	8.4

1) n 为样本数; 2) 平均值(最小值 ~ 最大值)

锌厂周围蔬菜可食用部分重金属含量见图 2. 叶菜类蔬菜可食用部分重金属含量排序为: Zn > Pb > Cd > Cu > Hg; 非叶菜类蔬菜可食用部分重金属含量排序为: Zn > Cu > Pb > Cd > Hg, 而蔬菜可食用部分的 Cu 含量相近,说明 Pb、Cd 较易在叶菜类蔬菜中积累, Hg 在蔬菜中的积累始终是最小的.蔬菜可食用部分重金属含量的顺序为: 叶菜类蔬菜 > 非叶菜类蔬菜,不同蔬菜可食用部分对同种重金属吸收能力不同.

2.3 重金属在蔬菜中的分布

选择葫芦岛锌厂周围普遍种植的蔬菜研究重金属在蔬菜中的分布(图 3).从图 3 中可以看出,选择的 6 种蔬菜除了韭菜根中的 Cu 含量高于叶片外,蔬菜叶片中的重金属含量普遍高于其它器官.豆角叶片中的重金属高于果实;番薯、胡萝卜叶片中的重金属含量高于果实(根);茄子、西红柿各器官中重金属

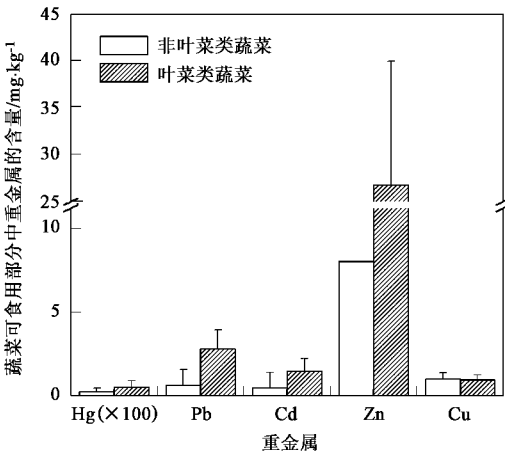
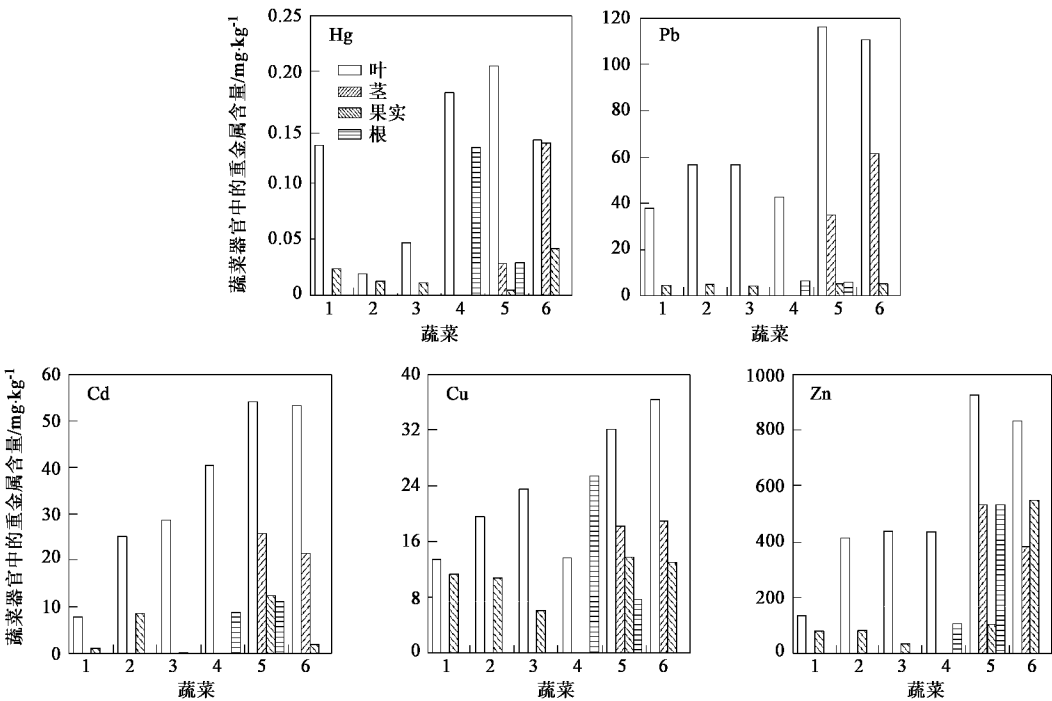


图 2 锌厂周围蔬菜中重金属的含量(鲜重)

Fig.2 Heavy metal contents in the edible parts of vegetables



1. 豆角 *Phaseolus vulgaris* L.; 2. 胡萝卜 *Daucus carota* L. var. *sativa* Hoffm.; 3. 番薯 *Ipomaea batatas* (L.) Lam;
4. 韭菜 *Allium tuberosum* Rottl.ex Spreng.; 5. 茄子 *Aolarnum melongena* L.; 6. 西红柿 *Lycopersicon esculentum* Mill.

图3 重金属在蔬菜中的分布(鲜重)

Fig.3 Distribution of heavy metals in the tissues of vegetables

含量均为:叶>茎>根>果实.

2.4 重金属在土壤-蔬菜中的转移因子

土壤-植物转移因子(通常也被称为吸收因子、积累因子、浓缩因子)可以评估一种重金属从土壤转移到植物的转移潜能.转移因子一般被定义为植物中重金属的含量与相应土壤中重金属含量的比值^[2,11,12].锌厂周围重金属在土壤-蔬菜的转移因子见表2,3.

3 讨论

3.1 土壤中重金属的来源分析

图4为锌厂周围土壤中重金属含量随距离锌厂远近的关系.土壤中的Hg、Pb、Cd、Zn和Cu的含量随距离锌厂远近的增加而减小,在800m左右的采样点C(图1,下同)有所上升,这主要是该处采样点位于葫芦岛市五里河岸边,锌厂常年向五里河排放污水,河岸两边的土壤受到河水的严重污染,因此该采样点土壤中的重金属含量较高.距离锌厂1800m左右采样点H、G的重金属含量高于1600m采样点B,这主要是由于在1800m左右的采样点处于锌厂的下风向,距离锌厂1600m左右的采样点偏离了下

风向.锌厂周围土壤中重金属含量的差异与距离污染源的远近及风向关系密切,且锌厂周围土壤中重金属相互之间显著性相关(表4).采集而来的样品没有明显受到的锌厂排放的废渣影响,因此,锌厂周围土壤(五里河岸边C采样点除外)中重金属的来源相同,可能均来源于大气沉降,即葫芦岛锌厂排放的废气.

3.2 重金属在土壤-蔬菜中的转移

3.2.1 重金属在土壤-蔬菜可食用部分中的转移

重金属在蔬菜可食用部分的转移因子排序为: Cd>Zn>Cu>Pb>Hg(表2),蔬菜Cd的转移因子范围为0.0001~0.344,平均值为0.081,分别是Hg、Pb转移因子的7倍以上,是Zn、Cu转移因子的5倍以上,说明Cd较其它重金属更易从土壤中转移到蔬菜的可食用部分.Cd和Zn离子半径、原子核外层的电子结构相似,它们对核酸代谢有相似的影响方式,Cd进入细胞后,与Zn竞争锌酶中Zn的结合部位,进而取代锌^[3],因此Cd在蔬菜中的转移能力要高于Zn.但后者是植物生长必需元素,故两者在剂量效应上有所不同.

Cu、Pb、Hg在土壤中的富集程度为: Hg>Pb>

表 2 重金属在土壤-蔬菜可食用部分中的转移因子

蔬菜(样品数)	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu
叶菜类蔬菜可食用部分					
芹菜 <i>Apium graveolens</i> L.(4)	0.010	0.015	0.131	0.021	0.014
白菜 <i>Brassica pekinensis</i> (Lour.) Rupr.(5)	0.016	0.017	0.111	0.031	0.013
韭菜 <i>Allium tuberosum</i> Rottl.ex Spreng(5)	0.013	0.019	0.158	0.038	0.022
葱 <i>Allium Fistulosum</i> L.(4)	0.010	0.006	0.044	0.017	0.010
生菜 <i>Lactuca sativa</i> L. var. <i>romana</i> Hort(5)	0.015	0.024	0.203	0.022	0.011
菠菜 <i>Spinacia oleracea</i> L.(4)	0.005	0.025	0.098	0.041	0.034
青菜 <i>Brassica chinensis</i> L.(2)	0.031	0.019	0.174	0.037	0.016
芫荽 <i>Coriandrum sativum</i> L.(4)	0.021	0.039	0.344	0.024	0.020
雪里红 <i>Brassica juncea</i> (L.) czern.et coss.var. <i>multiceps</i> Tsen et Lee(3)	0.010	0.021	0.087	0.032	0.019
非叶菜类蔬菜可食用部分					
豆角 <i>Phaseolus vulgaris</i> L.(13)	0.008	0.003	0.017	0.010	0.020
豇豆 <i>Vigna sinensis</i> (L.) Savi(3)	0.001	0.003	0.004	0.009	0.028
南瓜 <i>Cucurbita moschata</i> (Duch.) poiret.(5)	0.000	0.001	0.001	0.005	0.009
丝瓜 <i>Luffa cylindrical</i> (L.) Roem(4)	0.000	0.001	0.023	0.005	0.014
苦瓜 <i>Momordica charantia</i> L.(3)	0.016	0.003	0.005	0.008	0.014
茄子 <i>Aolanum melongena</i> L.(10)	0.002	0.001	0.062	0.004	0.014
西红柿 <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.(11)	0.004	0.002	0.003	0.003	0.010
菜椒 <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>grossum</i> (L.) sendt(17)	0.009	0.012	0.089	0.017	0.019
胡萝卜 <i>Daucus carota</i> L. var. <i>sativa</i> Hoffm(5)	0.009	0.008	0.092	0.012	0.022
番薯 <i>Ipomaea batatas</i> (L.) Lam(3)	0.002	0.001	0.000	0.001	0.004
布留克 <i>Brassica napobrassica</i> (L.)Mill(3)	0.010	0.023	0.104	0.029	0.016
叶菜类蔬菜	0.013	0.018	0.131	0.028	0.016
非叶菜类蔬菜	0.006	0.005	0.046	0.010	0.017
总体平均	0.009	0.010	0.081	0.017	0.017

表 3 重金属在土壤-蔬菜不可食用部分中的转移因子

蔬菜	器官	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu
豆角 <i>Phaseolus vulgaris</i> L.	叶	0.030	0.014	0.078	0.009	0.011
番薯 <i>Ipomaea batatas</i> (L.) Lam	叶	0.005	0.019	0.105	0.024	0.020
胡萝卜 <i>Daucus carota</i> L. var. <i>sativa</i> Hoffm	叶	0.005	0.018	0.088	0.023	0.016
韭菜 <i>Allium tuberosum</i> Rottl.ex Spreng	根	0.004	0.015	0.098	0.026	0.015
茄子 <i>Aolanum melongena</i> L.	叶	0.010	0.024	0.132	0.032	0.023
	茎	0.010	0.003	0.030	0.007	0.005
	根	0.011	0.004	0.089	0.014	0.008
西红柿 <i>Aolanum melongena</i> L.	叶	0.006	0.026	0.088	0.029	0.024
	茎	0.006	0.011	0.028	0.009	0.011

表 4 土壤中重金属之间的相关性¹⁾

Table 4 Relationship between the heavy metals in soil					
	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu
Hg	1	0.948 8	0.895 5	0.935 0	0.906 2
Pb		1	0.921 9	0.954 5	0.935 6
Cd			1	0.966 9	0.841 3
Zn				1	0.856 3
Cu					1

1) $p < 0.001$; $n = 17$

Cu,而在土壤-蔬菜可食用部分中的转移因子排序为: Cu> Pb> Hg,说明土壤中高浓度的重金属抑制重金属在土壤-蔬菜中的转递^[1,13]. Pb、Hg 同 Cd、Zn

相比,离子特征、螯合性能有较大的差异,它们对核酸代谢的影响较 Cd、Zn 差异也大.相对较小的 Pb 转移因子表明 Pb 不易从土壤中向蔬菜的可食用部分转移.Hg 在所研究的重金属当中是转移能力最弱的元素,这主要是因为土壤中含量较高的腐殖酸和有机质能与汞形成惰性化合物,从而影响汞的迁移^[14].

叶菜类蔬菜可食用部分 Hg、Pb、Cd、Zn 和 Cu 的转移因子要高于非叶菜类蔬菜,说明叶菜类蔬菜的可食用部分对重金属的吸收能力要远高于非叶菜类蔬菜.叶菜类蔬菜中芫荽的重金属转移因子高于其它蔬菜,而葱则与之相反,在所研究蔬菜中吸收能力

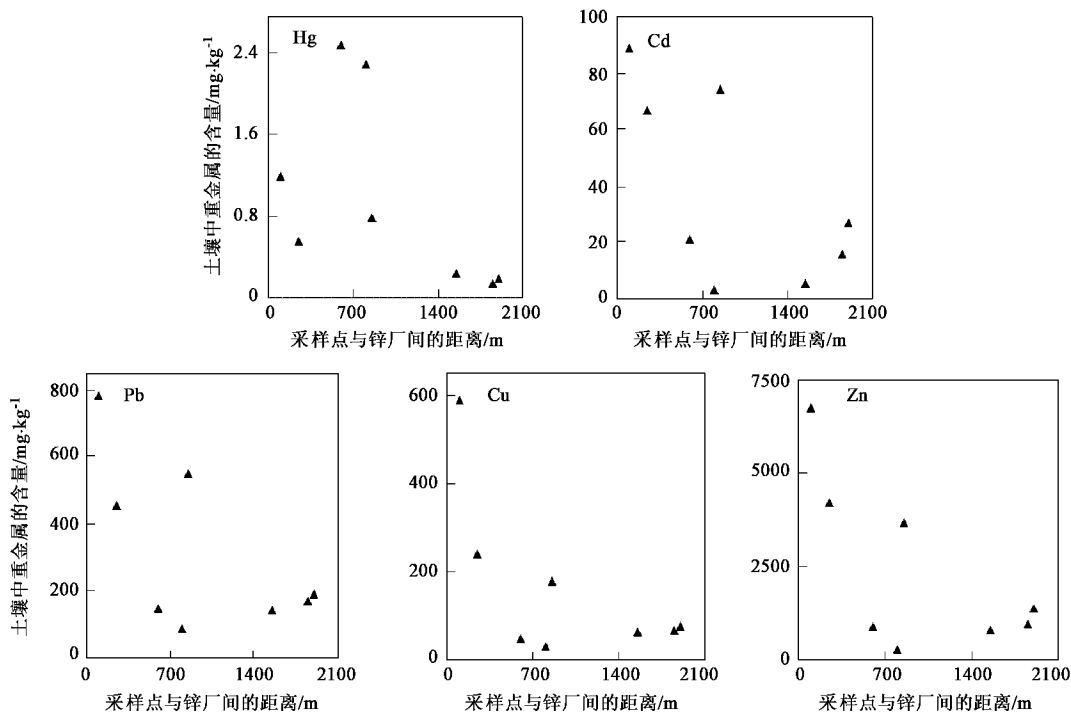


图 4 土壤中重金属的含量与距离锌厂的远近之间的关系

Fig.4 Relationship between the contents of heavy metals and the distance to Huludao zinc smelting plant

最小.非叶菜类蔬菜中菜椒、布留克重金属的转移因子高于其它蔬菜,而番薯可食用部分重金属的转移因子最小.当地居民应避免食用较易富集重金属的叶菜类蔬菜.

3.2.2 重金属在土壤-蔬菜不可食用部分的转移

比较表 2 和表 3 研究重金属在蔬菜中各个器官的转移因子,结果发现蔬菜叶片中重金属转移因子要高于其它器官的转移因子.这可能有 2 方面的原因,一方面是蔬菜从土壤中直接吸收重金属,锌厂周围土壤偏酸性(pH 在 5~7 之间),有利于重金属随营养物质被输送到地上部分,另一方面可能是富含重金属的空气颗粒物落在蔬菜叶面上,叶片通过气

孔直接吸收了尘埃中的重金属^[15].

3.3 不同地区重金属在土壤-蔬菜中转移因子的比较

比较不同地点种植蔬菜可食用部分的转移因子(表 5).从表 5 可以看出非叶菜类蔬菜番薯、豇豆中 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的转移因子均小于南宁地区,这说明受到重金属复合污染地区,土壤中的重金属彼此之间可能会抑制蔬菜可食用对其它金属的吸收^[16]. Alina^[17]研究也发现植物可以显示出对生长媒介成分的适应性,当外部的重金属浓度过高时,可以排斥重金属的吸收.叶菜类蔬菜雪里红中 Pb 和 Cd 的转移因子要高于南宁地区,Zn 和 Cu 的转移因子小于

表 5 不同地点蔬菜可食用部分重金属转移因子的比较						
Table 5 Comparison of transfer factor of heavy metals in the different areas						
地点	蔬菜可食用部分	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu
葫芦岛锌厂周围	雪里红 <i>Brassica juncea</i> (L.)	0.010	0.021	0.087	0.032	0.019
	番薯 <i>Ipomaea batatas</i> (L.) Lam	0.002	0.001	0.000	0.001	0.004
	豇豆 <i>Vigna sinensis</i> (L.) Savi	0.001	0.003	0.004	0.009	0.028
南宁市郊冶炼厂周围受污染地区 ^[2]	雪里红 <i>Brassica juncea</i> (L.)		0.017	0.073	0.046	0.024
	番薯 <i>Ipomaea batatas</i> (L.) Lam		0.017	0.073	0.086	0.350
	豇豆 <i>Vigna sinensis</i> (L.) Savi			0.001	0.021	0.017
南宁市郊冶炼厂周围受控制地区 ^[2]	雪里红 <i>Brassica juncea</i> (L.)		0.002	0.086	0.064	0.029
	番薯 <i>Ipomaea batatas</i> (L.) Lam		0.001	0.977	0.078	0.102
	豇豆 <i>Vigna sinensis</i> (L.) Savi		0.003	0.034	0.065	0.055

南宁地区,而铅不易从土壤向蔬菜中转移,这说明锌厂附近的蔬菜中 Pb 可能不完全来源于土壤,而部分来源于大气,导致铅的表现转移因子较高.

大气汞是植物体内汞的主要来源,不像其它重金属来源于土壤,植物从土壤中吸收的汞是非常有限的^[18-20].从土壤中吸收的汞绝大部分滞留在根部,而不会向茎部和叶片迁移.由于植物根部生物量较小,根部吸收也可能会达到饱和,所以限制了汞的吸收^[13].锌厂周围蔬菜中汞的转移因子最小,而蔬菜叶汞高于根汞,因此锌厂周围蔬菜叶片中的汞来源于大气.锌厂周围汞在土壤-蔬菜中表现的转移因子要高于实际的数值.

4 结论

锌厂周围土壤、蔬菜受到重金属的严重污染.锌厂周围重金属在土壤-蔬菜中的转移能力为 Cd > Zn > Cu > Pb > Hg.叶菜类蔬菜中茼蒿的重金属转移因子都高于其它蔬菜,而葱则与之相反,在所研究蔬菜中吸收能力最小.非叶菜类蔬菜中菜椒、布留克重金属的转移因子高于其它蔬菜,而番薯可食用部分重金属的转移因子最小.重金属从土壤向蔬菜叶片中的转移能力高于蔬菜的其它器官.土壤中重金属主要来源于锌厂周围的大气,蔬菜叶片中的 Pb 可能部分来源于大气,蔬菜叶片中的汞主要来源于大气.

参考文献:

[1] Wang G, Su M, Chen Y, *et al.* Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **144**: 127 ~ 135.

[2] Cui Y L, Zhu Y G, Zhai R H, *et al.* Transfer of metals from soil to vegetables in an area near a smelter in Nanning, China[J]. *Environment International*, 2004, **30**: 785 ~ 791.

[3] 崔玉静, 赵中秋, 刘文菊, 等. 镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因子[J]. *生态学报*, 2003, **23**(10): 2133 ~ 2143.

[4] Dudka S, Piotrowska M, Terelak H. Transfer of cadmium, lead, and zinc from industrially contaminated soil to crop plants: A field study[J]. *Environmental Pollution*, 1996, **94**: 181 ~ 188.

[5] Wang Q, Yan B, Zhang S. Distribution Characteristics of Mercury in the Region Contaminated by Zinc Smelting and Chlor-alkali

Production[A].In: Trindade R B E, Melamed R, Sobral L G L, *et al.* XIII international conference on heavy metals in the environment [M]. Rio De Janeiro, Brazil: CETEM/MCT, 2005.199.

[6] 赵连娣, 彦惠芬. 葫芦岛市五里河沿岸土壤汞污染状况及评价[J]. *土壤通报*, 1997, **28**(2): 68 ~ 70.

[7] 欧行奇, 任秀娟, 杨国堂. 蔬菜型甘薯百薯 1 号茎尖营养成分分析[J]. *河南农业科学*, 2005, **12**: 30 ~ 33.

[8] Liu H, Probst A, Liao B. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **339**: 153 ~ 166.

[9] 顾继光, 林秋奇, 胡韧, 等. 矿区重金属在土壤-作物系统转移行为的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(4): 634 ~ 637.

[10] Boularbah A, Schwartz C, Bitton G, *et al.* Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**: 802 ~ 810.

[11] Chumbley C G, Unwin R J. Cadmium and lead content of vegetable crops grown on land with a history of sewage sludge application [J]. *Environmental Pollution (Series B)*, 1982, **4**: 231 ~ 237.

[12] Harrison R M, Chirgawi M B. The assessment of air and soil as contributors of some trace metals to vegetable plants III -Experiment with field-grown plants [J]. *Science of the Total Environment*, 1989, **83**: 47 ~ 63.

[13] Patra M, Sharma A. Mercury toxicity in plants [J]. *Bot Rev*, 2000, **66**: 379 ~ 422.

[14] 丁爱芳, 潘根兴. 南京城郊零散菜地土壤与蔬菜重金属含量及健康风险分析[J]. *生态环境*, 2003, **12**: 409 ~ 411.

[15] Wang D Y, Qing C L, Guo T Y, *et al.* Effects of humic acid on transport and transformation of mercury in soil-plant systems [J]. *Water, Soil and Air Pollution*, 1997, **95**: 35 ~ 43.

[16] Fayiga A O, Ma L O, Cao X, *et al.* Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**: 289 ~ 296.

[17] Alina K. Soil-plant transfer of trace elements-an environmental issue [J]. *Geoderma*, 2004, **122**: 143 ~ 149.

[18] Schwesig D, Krebs O. The role of ground vegetation in the uptake of mercury and methylmercury in a forest ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2003, **253**: 445 ~ 455.

[19] Fleck J A, Grigal D F, Nater E A. Mercury uptake by trees: An observational experiment [J]. *Water, Soil and Air pollution*, 1999, **115**: 513 ~ 523.

[20] Barghigiani C, Ristori T, Bauleo R. Pinus as an atmospheric Hg biomonitor [J]. *Environment Technology*, 1991, **12**: 1175 ~ 1181.