

葫芦岛市土壤、蔬菜重金属污染空间变化规律

郑娜, 王起超, 刘景双, 王洋, 张仲胜

(中国科学院东北地理与农业生态研究所湿地生态与环境重点实验室, 长春 130012)

摘要:采用 Krige 插值法分析葫芦岛市土壤重金属的空间变化规律, 测定葫芦岛市土壤、蔬菜、粮食中 Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的含量, 应用指数方程和幂指数方程描述重金属与污染源的关系, 分析土壤重金属的来源, 并通过对当地种植和市售蔬菜、粮食重金属的比较, 研究冶炼-氯碱工业对土壤与农作物生态系统的影响. 结果发现葫芦岛市土壤受到重金属污染严重, Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含量分别是 1.422、443.1、60.94、4 084、247.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最大值分别达到 6.092、3 195、341.7、35 157、1 557 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Cd、Zn 污染属于重污染, Hg、Pb、Cu 属于中度污染. 土壤中 Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的污染主要呈现以葫芦岛锌厂为中心, 向外围辐散降低的规律, 其中 Hg 还受到氯碱工业的影响. 葫芦岛市土壤重金属主要来源于大气沉降, 指数方程和幂指数方程均能很好地描述 Pb、Cd、Zn、Cu 在土壤中随距离的变化趋势. 地产农作物的重金属含量远高于市售农作物, 则进一步说明了重金属对葫芦岛市土壤生态系统带来了严重影响.

关键词:土壤; 农作物; 重金属; 锌冶炼; 空间分布

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)07-2071-06

Spatial Variation of Heavy Metals Contamination in the Soil and Vegetables of Huludao City

ZHENG Na, WANG Qi-chao, LIU Jing-shuang, WANG Yang, ZHANG Zhong-sheng

(Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu concentrations in the soil, vegetables and crop of Huludao city were investigated. The Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu concentrations in soils of the smelting areas are 1.422, 443.1, 60.94, 4 084, and 247.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, thus 6.092, 3 195, 341.7, 35 157, and 1 557 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for the maximal concentrations, respectively. Spatial distribution maps of heavy metals concentrations in top soils in Huludao City were separately laid out by using Kriging. Heavy metals spatial distribution patterns in soils show that Pb, Cd, Zn, Cu emissions from Huludao Zinc Plant are the main pollution sources of heavy metals to the top soils in Huludao City, but Hg emission from Huludao Zinc Plant and chlor-alkali industry is the main pollution source of mercury to the top soils. Heavy metals concentrations in top soils decrease exponentially with distance from the zinc smelting area. Except Hg, the exponential equation could be better to fit the variety for other heavy metals. Heavy metals in vegetable and crop cultivated around Huludao Zinc Plant are higher than from markets, suggests that heavy metals affect the local soil and crops seriously.

Key words: soil; crop; heavy metal; zinc smelting; spatial distribution

土壤重金属污染一方面影响土壤的生态功能, 同时污染物还通过食物链传递和土壤颗粒物直接进入人体, 影响区域环境质量, 食品安全和人群健康, 因此土壤重金属污染已逐渐受到国内外普遍关注^[1-4]. 许多有色金属矿通常是多金属密集矿, 普遍有重金属元素的共生和伴生现象^[5,6], 因此有色冶金区是重金属严重污染的地区. 目前国内外对土壤重金属污染的研究较多, 但采用指数方程描述冶炼地区土壤重金属空间变化规律, 探讨污染源类型, 进而研究土壤重金属污染对生态系统的影响则相对较少. 亚洲第一大锌厂——葫芦岛锌厂地处葫芦岛市工业区, 多年来, 土壤重金属污染非常严重, 昔日的重金属仍然残留在土壤中, 导致当地种植的蔬菜、粮食受到重金属的严重污染^[7,8]. 而葫芦岛市锦西化工

集团有限公司, 1998 年前使用汞阴极, 也造成了其周边土壤汞的严重污染. 本研究分析土壤重金属的来源, 并通过对当地种植和市售蔬菜、粮食重金属的比较, 确定冶炼-氯碱工业对土壤与农作物生态系统的影响, 以期为重金属区域复合污染空间模式的建立提供依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

收稿日期: 2008-08-26; 修订日期: 2008-12-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(40803021); 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动专项(08B3061); 中国科学院东北地理与农业生态研究所青年博士基金项目(08H2101)

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

以葫芦岛市的连山区、龙港区为主,根据葫芦岛市自然地理状况、污染源分布、工业及交通等具体条件,以锌冶炼-氯碱生产复合区为中心进行布点,共设置 76 个采样点(图 1).使用不锈钢铁锹,先冲洗擦拭干净,以避免污染样品,在样点的 4 个方位采集 0~10 cm 表层剖面土壤,混合均匀,并做好采样的现场记录,于 2006 年 10 月共采集土壤样品 113 个.在锌厂周围的采样点采样同时,采集相应地点种植 6 种蔬菜、2 种粮食样品 201 个(图 1),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 塑料筛备用.为了对农作物重金属污染状况进行对比,根据葫芦岛市大中型蔬菜市场分布,同时采集葫芦岛市售蔬菜、粮食样品 189 个,采集方法同上.

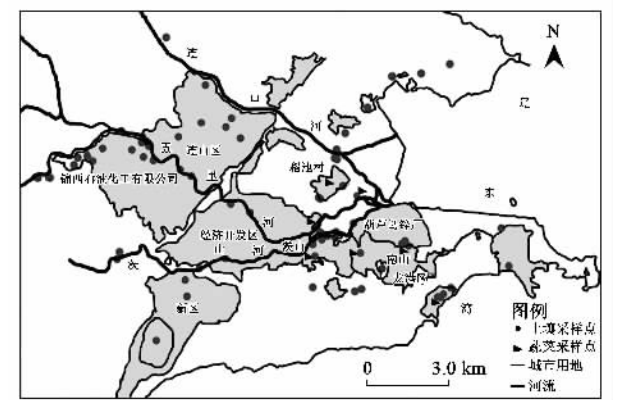


图 1 葫芦岛市土壤采样的空间分布

Fig.1 Distribution of soil sampling sites in Huludao City

1.2 样品分析

从土壤样品中拣去石头、树叶、瓜子壳等杂物,然后将土壤样品在室温下自然风干,研磨,过 0.149 mm 筛,待用.土壤样品经过 HNO₃-H₂SO₄-V₂O₅ 消化法消解(GB/T 17136-1997),采用 F732-V 智能型冷原子吸收测汞仪(上海华光)测定总汞,经过 HNO₃-HClO₄-HF 消化法消解(GB/T 17141-1997),采用日本

岛津等离子体发射光谱仪(ICPS-7500)测定 Pb、Cd、Zn、Cu,其中部分含量过低的样品经 GBC932AA 型火焰原子吸收-石墨炉(澳大利亚 GBC 科学仪器公司)测定.

取蔬菜、粮食样品的可食用部分 2~5 g,加入 5 mL HNO₃ 浸泡过夜,加入 2 mL HClO₄ 消解(GB/T 5009-2003),采用 GBC932AA 型火焰原子吸收-石墨炉(澳大利亚 GBC 科学仪器公司)测定 Pb、Cd、Zn、Cu;HNO₃-H₂SO₄-V₂O₅ 消化法(GB/T 5009.17-2003)消解,采用 F732-V 智能型冷原子吸收测汞仪(上海华光)测定总汞.

采用北京市环境监测中心的土壤环境标准参考样品[GBW 07405(GSS-5)]以及植物环境标准参考样品[GBW 07604(GSV-3)]检验,标准物质中 Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的测定值在标准值范围之内.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量概况

葫芦岛市土壤中重金属含量概况见表 1. Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 的平均含量分别是 1.422、443.1、60.94、4 084、247.8 mg·kg⁻¹,最大值分别达到 6.092、3195、341.7、35 157、1 557 mg·kg⁻¹.分别是辽宁省土壤背景值的 38、21、564、64、12.6 倍,并且远高于其它地区和国家(表 2),这说明葫芦岛市土壤中重金属有明显的累积效应,受污染严重.

采用单因子污染指数的方法^[9]评价葫芦岛市重金属污染,参照中国土壤环境质量标准(GB 15618-1995)来确定本次研究的标准.其中 $p \leq 1$ 为非污染,相应地区为非污染区; $1 < p \leq 2$ 为轻污染,相应地区为轻度污染区; $2 < p \leq 3$ 为中度污染,相应地区为中度污染区; $p > 3$ 为重污染,相应地区为重度污染区.通过对葫芦岛市土壤中重金属的单因子污染指数的比较,结果发现葫芦岛市土壤 Cd、Zn 污染属于重污染,而其它 3 种重金属属于中度污染,由此可以看出葫芦岛市土壤重金属污染严重.

表 1 葫芦岛市土壤重金属含量/mg·kg⁻¹
Table 1 Heavy metal concentrations in the soils of Huludao City/mg·kg⁻¹

元素	均值	中位数	标准差	最大值	最小值	偏度	环境土壤背景值 ¹⁾	单因子污染指数 p
Hg	1.422	0.535 8	1.608	6.092	0.090	1.338	0.037	2.93
Pb	443.1	99.82	747.2	3 195	28.75	2.387	21.6	2.77
Cd	60.94	10.01	106.4	341.7	0.441 1	1.899	0.108	85.7
Zn	4 084	690.7	8 574	35 157	110.0	2.749	63.5	11.9
Cu	247.8	60.03	415.4	1 557	27.37	2.275	19.8	2.43

1)中国环境监测总站,1990

2.2 地产粮食、蔬菜可食用重金属含量概况

选择当地种植和市场上较为普遍的 2 种粮食、6 种蔬菜进行重金属含量的测定(表 3)。结果发现,粮食中重金属的含量要高于蔬菜,地产蔬菜、粮食的重金属含量远高于市售蔬菜、粮食。重金属在不同地产蔬菜中的分布规律类似于市售蔬菜,白菜、韭菜中

重金属含量要明显高于其他蔬菜,胡萝卜中的重金属含量也相对较高,豆角的重金属含量最低。由此看出叶菜类蔬菜可食用部分的重金属含量要高于非叶菜类蔬菜。叶片气孔对大气中重金属的吸收,以及对表层大气颗粒物中重金属的吸收是导致叶菜类蔬菜中重金属偏高的主要原因^[15-17]。

表 2 不同地区土壤中重金属含量的比较/mg•kg⁻¹

地点	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu	文献
葫芦岛市	1.479	521.5	72.81	4 703	270.1	本研究
张家口市	0.140	30.35	0.176		32.00	[10]
湘南矿区		1 268	9.4	1 591	153.9	[11]
贵州赫章		9 000	43	11 000	120	[12]
Royal Horticultural Society's Garden		744.5	4.2	173 ~ 651	237.0	[13]
Varanasi, India		19.51	2.8	92.57	42.03	[14]

表 3 地产粮食、蔬菜可食用部分中重金属含量(鲜重)

Table 3 Heavy metal concentrations in the crops and vegetables from markets and farms of Huludao City (FW)

名称	市售粮食、蔬菜					地产粮食、蔬菜				
	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu
	/μg•kg ⁻¹	/μg•kg ⁻¹	/μg•kg ⁻¹	/mg•kg ⁻¹	/mg•kg ⁻¹	/μg•kg ⁻¹	/μg•kg ⁻¹	/μg•kg ⁻¹	/mg•kg ⁻¹	/mg•kg ⁻¹
豆角	0.079	4.147	4.685	3.45	0.98	2.002	481.0	115.0	8.310	1.165
韭菜	0.142	527.6	164.3	6.02	1.07	9.001	2 798	2 852	33.15	1.176
白菜	0.722	33.75	178.9	4.47	0.41	4.002	2 486	1 032	26.08	0.738
辣椒	0.150	8.349	54.69	3.50	1.65	4.112	1 601	960	16.72	0.992
西红柿	0.232	16.63	35.70	2.12	0.97	2.003	293.0	108.0	4.812	0.726
胡萝卜	0.895	4.121	147.9	4.26	0.62	3.000	1 136	871.0	10.58	1.346
平均值	0.37	99.09	97.69	3.97	0.95	4.02	1 465	989.7	16.6	1.023
大豆	1.296	63.89	17.97	32.29	8.78	5.907	1 694	407.0	44.70	2.761
玉米	1.226	177.4	21.28	2.90	2.12	8.801	388.0	217.1	57.51	13.82
平均值	1.261	120.6	19.62	17.59	5.45	7.354	1 041	312.05	51.10	8.290

2.3 土壤重金属含量的空间分布模式

葫芦岛市表层土壤中的重金属分布具有明显的规律性(图 2、图 3)。汞受到锌冶炼-氯碱生产复合污染,以锌冶炼、氯碱厂及其附近为中心向外围辐散降低^[18],Pb、Cd、Zn、Cu 主要呈现以锌厂为中心,向外围辐散降低的规律,显示出高架点源大气沉降作用的影响。

围绕葫芦岛锌厂周围的锌厂家属区、锌厂东墙外 Pb、Cd、Zn、Cu 的浓度分别达到了 1 729、304.1、14 752、1 557 mg•kg⁻¹和 1 083、254.3、10 195、629.3 mg•kg⁻¹,远远高于其它非锌厂区域土壤重金属的含量。葫芦岛市土壤中 Pb、Cd、Zn、Cu 之间有显著的相关性(表 4),而 Hg 与其它重金属之间没有显著的相关性,这说明葫芦岛市土壤中 Pb、Cd、Zn、Cu 的来源相近,而与 Hg 的来源不同。葫芦岛锌厂是葫芦岛市土壤中重金属的主要来源,另外氯碱厂的汞排放则是土壤汞污染的另一个来源,化机桥汞含量相对较高,主要由于以前氯碱厂的汞排放,在土壤中累积所致。另外,由于南山、茨山的海拔较高,而且位于葫芦岛锌厂的下风向,因此在南山、茨山土壤中重金属含量相对较高。根据葫芦岛市土壤中重金属的空间分布,以葫芦岛锌厂为中心,采用指数方程和幂指数方程对距离葫芦岛锌厂不同远近采样点的重金属含量进行拟合(图 4、表 5)。

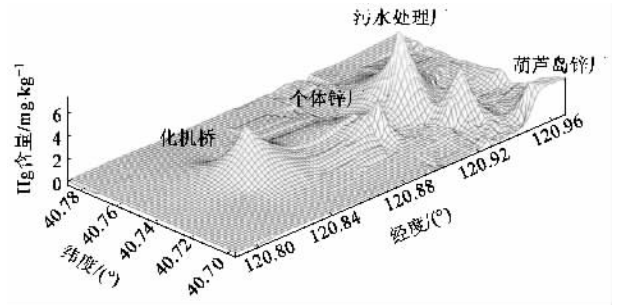


图 2 锌冶炼-氯碱生产复合区表层土壤汞含量分布示意^[18]

Fig. 2 Distribution of mercury contents in the soil of Huludao City

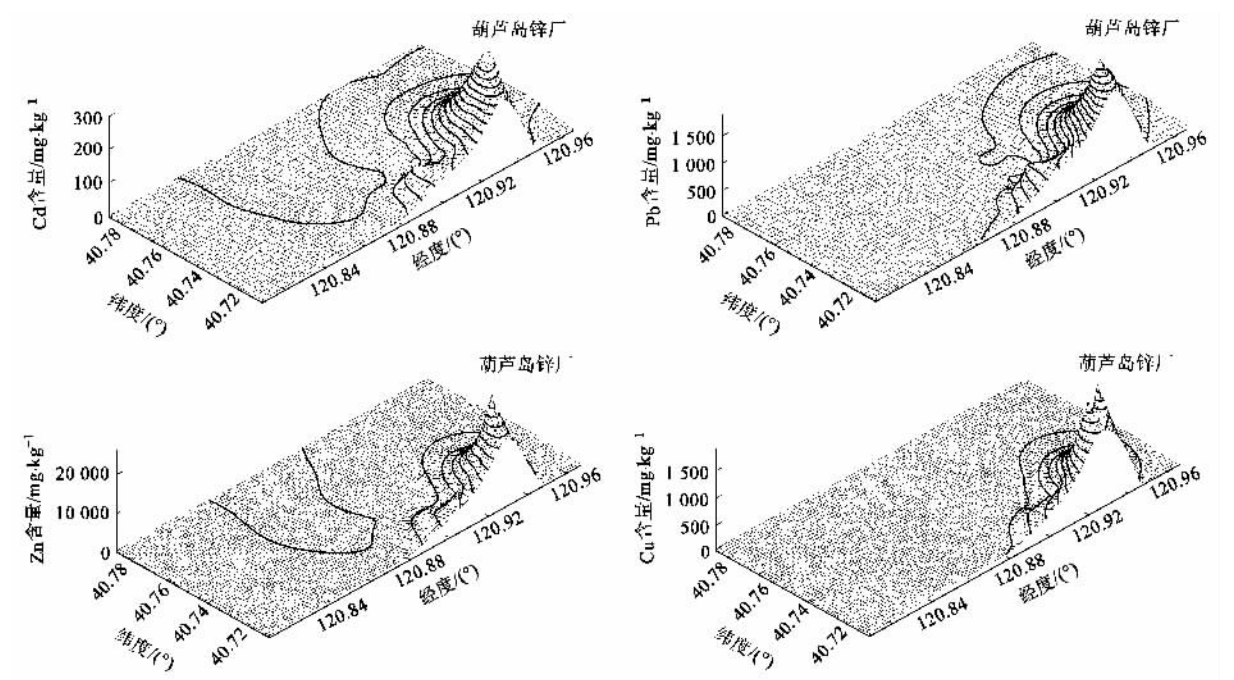


图 3 葫芦岛市表层土壤重金属含量分布示意

Fig.3 Distribution of heavy metal contents in the surface soil of Huludao City

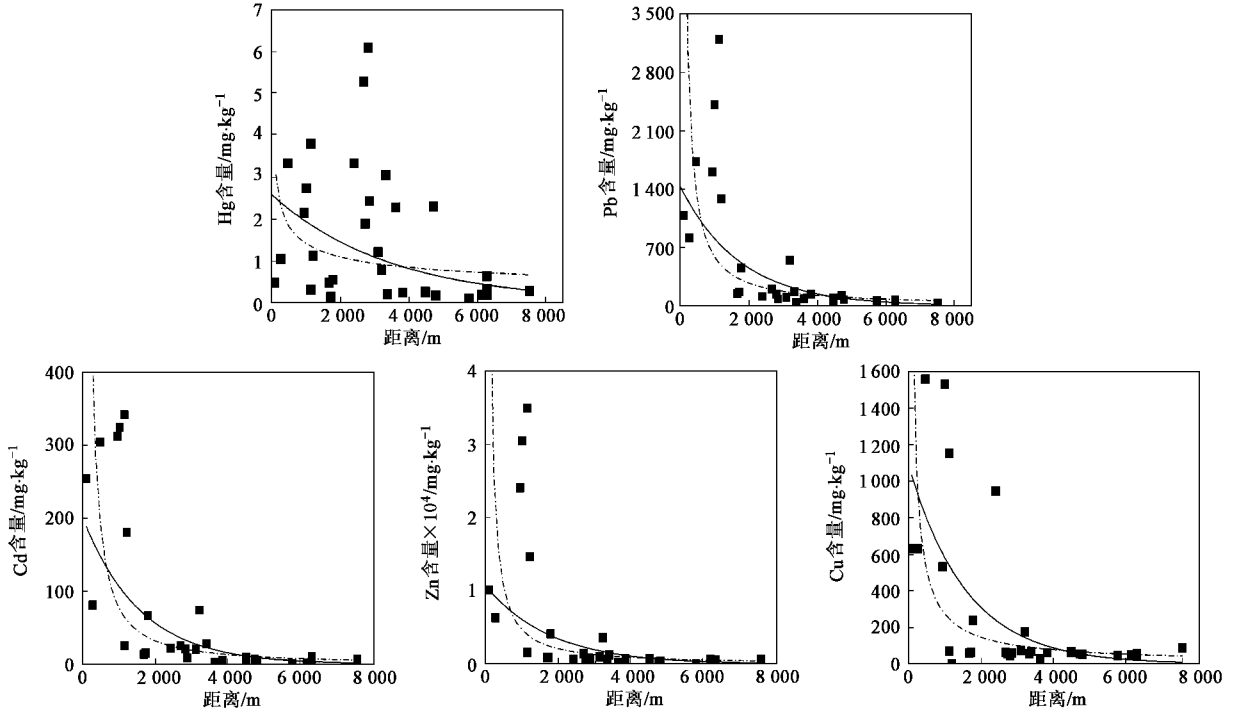


图 4 土壤中重金属含量的分布模式

Fig.4 Distribution of heavy metals in the soil with different distances to Huludao Zinc Plant

Feng 等^[19]也曾使用指数方程较好地描述土壤中 Hg 随距离的变化,说明指数方程能够很好地描述由于大气沉降造成的土壤污染趋势.从表 4 可以看出,指数方程和幂指数方程均能很好地描述 Pb、Cd、Zn、Cu 在土壤中随距离的变化趋势,离锌厂越近,土壤

中重金属的污染则越严重,而离锌厂越远,土壤中重金属污染则越轻,进一步说明了葫芦岛锌厂的大气排放是葫芦岛市土壤重金属污染的主要来源.但从表 4 中也能看出指数方程和幂指数方程不能很好地描述 Hg 的污染变化趋势,这主要是由于 Hg 的来源

与其它金属的不同,土壤中 Hg 的污染不仅是锌冶炼造成的,而是锌冶炼-氯碱生产复合污染的结果.在距离锌厂2 000 m之内,土壤中的 Pb、Cd、Zn、Cu 都大幅度降低,2 000 m以外的 Pb、Cd、Zn、Cu 的污染明显减小.而土壤中的 Hg 浓度直到距离锌厂5 000 m 以外才大幅度降低.

2.4 重金属污染对农作物的影响

选择葫芦岛种植的地产蔬菜、粮食和市售蔬菜、

表4 土壤中重金属之间的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis between heavy metals in the soils

	Hg	Pb	Cd	Zn	Cu
Hg	1	0.042	0.239	0.233	0.300
Pb		1	0.718 *	0.697 *	0.616 *
Cd			1	0.961 *	0.853 *
Zn				1	0.839 *
Cu					1

1) 表示 $p < 0.01$

表5 距离葫芦岛锌厂不同距离采样点的重金属含量分布模式
Table 5 Estimated exponential equation of heavy metals in the soil of Huludao City

重金属	方程(1)		方程(2)		样本数
	$y = ax^b$	R^2	$y = a \exp [bx]$	R^2	
Hg	$y = 3.5097 x^{-0.1116}$	0.018 1	$y = 2.287 \exp [-0.00014 x]$	0.092 1	37
Pb	$y = 11632 x^{-0.4024}$	0.229 9	$y = 1945 \exp [-0.00055 x]$	0.472 9	37
Cd	$y = 2937 x^{-0.4831}$	0.340 3	$y = 305.8 \exp [-0.00064 x]$	0.553 6	37
Zn	$y = 108850 x^{-0.4016}$	0.174 9	$y = 19931 \exp [-0.00057 x]$	0.346 7	37
Cu	$y = 8358 x^{-0.4459}$	0.245 6	$y = 1100 \exp [-0.00063 x]$	0.424 9	37

粮食进行比较.从表3可以看出,地产蔬菜、粮食中的 Hg、Pb、Cd、Zn 的含量远超过市售蔬菜.地产蔬菜中的 Hg 含量接近地产粮食中 Hg 含量,市售蔬菜的 Hg 含量则要低于市售粮食 Hg 的含量;地产蔬菜中的 Pd、Cd 含量要高于地产粮食,这可能是主要由于蔬菜叶片通过气孔对表层的灰尘或者空气中的悬浮颗粒物中的 Pd、Cd 的吸收导致蔬菜可食用部分(叶片)的 Pb、Cd 含量偏高^[20,21];而市售蔬菜、粮食中的 Cu 含量类似于地产蔬菜、粮食,这可能两方面的原因:一方面是土壤中其它重金属含量较高,影响地产蔬菜对土壤中营养元素的吸收;另一方面,市售蔬菜来自兴城或者葫芦岛郊区,葫芦岛郊区等地区可能存在 Cu 的污染^[22],导致蔬菜、粮食的 Cu 含量较高.

经调查葫芦岛市蔬菜、粮食一般来源于本地或者兴城市(靠近葫芦岛市西南方),本地种植蔬菜、粮食的重金属含量要高于市售蔬菜、粮食,远高于国家规定的食品污染物最大限量(GB 2762-2005),同时也远高于其它地区、城市种植的蔬菜、粮食.而人们食用地产、市售蔬菜、粮食是随机的,因此,当地居民食用地产粮食、蔬菜存在着健康风险^[23].市售蔬菜、粮食虽然低于国家食品中污染物限量(GB 2762-2005-Hg、Pb、Cd; GB 15199-94-Cu; GB 13106-1991-Zn),但是却高于其它城市蔬菜、粮食的重金属含量^[24,25],这可能是由于市售粮食、蔬菜可能部分来源于本地,从而提高了市售蔬菜、粮食重金属的平均含量.葫芦岛市土壤重金属污染已经严重影响了当地居民的人群健康.

3 结论

(1) 葫芦岛市土壤 Cd、Zn 污染属于重污染,而其它几种重金属属于中度污染.土壤中 Pb、Cd、Zn、Cu 主要呈现以锌厂为中心,向外围辐散降低的规律,显示出高架点源大气沉降作用的影响.土壤中 Hg 的污染是锌冶炼-氯碱生产复合污染的结果.

(2) 指数方程和幂指数方程均能很好地描述 Pb、Cd、Zn、Cu 在土壤中随距离的变化趋势,说明葫芦岛锌厂的大气排放是葫芦岛市土壤重金属污染的主要来源.但指数方程和幂指数方程不能很好地描述 Hg 的污染变化趋势.

(3) 葫芦岛市环境中重金属的污染,地产蔬菜的重金属含量远高于市售蔬菜、粮食.白菜、韭菜中重金属含量要明显高于其他蔬菜,胡萝卜中的重金属含量也相对较高,豆角的重金属含量最低.而市场上部分来源于本地的粮食、蔬菜也提高了市售蔬菜、粮食重金属的平均含量.

参考文献:

[1] Aelion M C, Davis T H, McDermoot S, et al. Metal concentrations in rural topsoil in South Carolina potential for human health impact [J]. Sci Total Environ, 2008, 402(2-3): 149-156.

[2] Nriagu J O, Pacyna J M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soil by trace metals [J]. Nature, 1988, 333: 134-139.

[3] 丁竹红,尹大强,胡忻,等.矿区附近农田土壤中重金属和矿质元素浸提研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1774-1778.

- [4] Razo I, Carrizales L, Castro J, *et al.* Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico[J]. *Water Air Soil Poll*, 2004, **152**(1-4): 129-152.
- [5] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 湘西多金属矿区汞铅污染土壤的环境质量[J]. *环境科学*, 2005, **26**(5): 187-191.
- [6] Rodríguez L, Ruiz E, Alonso-Azcárate J, *et al.* Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb-Zn mine in Spain [J]. *J Environ Manage*, 2009, **90**(2): 1106-1116.
- [7] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao Zinc Plant in China via consumption of vegetables[J]. *Sci Total Environ*, 2007, **383**(1-3): 81-89.
- [8] Zheng N, Wang Q C, Zheng D M. Mercury contamination and health risk to crops around the zinc smelting plant in Huludao City, northeastern China [J]. *Environ Geochem Health*, 2007, **29**(5): 385-393.
- [9] 陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 等. 基于污染指数法和 GIS 技术评价江西德兴矿区土壤重金属污染[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, **38**(1): 105-111.
- [10] 邵学新, 黄标, 赵永存, 等. 长江三角洲典型地区土壤中重金属的污染评价[J]. *环境化学*, 2008, **27**(2): 218-221.
- [11] 雷鸣, 廖柏寒, 曾清如, 等. 湘南某矿区菜园土中典型重金属的形态分析[J]. *环境化学*, 2007, **26**(6): 779-782.
- [12] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, *et al.* Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhang county, western Guizhou, China [J]. *Environ Int*, 2006, **32**(7): 883-890.
- [13] Alexander P D, Alloway B J, Dourado A M, *et al.* Genotypic variations in the accumulation of Cd, Cu, Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetable [J]. *Environ Pollut*, 2006, **144**(3): 736-745.
- [14] Sharma R K, Agrawal M, Marshall F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2007, **66**(2): 258-266.
- [15] 李永华, 杨林生, 姬艳芳, 等. 铅锌矿区土壤-植物系统中植物吸收铅的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(1): 196-201.
- [16] 庄树宏, 王克明. 城市大气重金属(Pb, Cd, Cu, Zn)污染及其在植物中的富集[J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2000, **13**(1): 31-37.
- [17] Yang Y, Zhang F S, Li H F, *et al.* Accumulation of cadmium in the edible parts of six vegetable species grown in Cd-contaminated soils [J]. *J Environ Manage*, 2009, **90**(2): 1117-1122.
- [18] 郑冬梅, 王起超, 郑娜, 等. 锌冶炼-氯碱复合污染区土壤汞的空间分布[J]. *土壤通报*, 2007, **38**(2): 361-364.
- [19] Feng X B, Li G H, Qiu G L. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang County, Guizhou, China: Part 2. Mercury contaminations to soil and crop [J]. *Sci Total Environ*, 2006, **368**(1): 47-55.
- [20] 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 Air Soil Poll*, 1997, **95**(1-4): 35-43.
- [21] Zheljaskov V D, Nielsen N E. Effect of heavy metals on peppermint and cornmint [J]. *Plant Soil*, 1996, **178**(1): 59-66.
- [22] 李亮亮, 依艳丽, 王延松. 葫芦岛市连山区、龙港区土壤重金属空间分布及污染评价[J]. *土壤通报*, 2006, **37**(3): 495-499.
- [23] 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康奉献评价[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2327-2330.
- [24] 白云. 郑州市郊污灌区蔬菜重金属污染状况[J]. *农业环境与发展*, 2002, **19**(5): 27-31.
- [25] 姚春霞, 陈振楼, 张菊, 等. 上海浦东部分蔬菜重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(4): 761-765.