

矿区重金属在土壤-作物系统迁移行为的研究

——以辽宁省青城子铅锌矿为例

顾继光¹, 林秋奇¹, 胡 韧¹, 诸葛玉平², 周启星²

(1.暨南大学水生物研究所, 广东 广州 510632; 2.中国科学院沈阳应用生态研究所,中国科学院陆地生态过程重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要:应用野外调查的方法,研究了辽宁省青城子铅锌矿矿区土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn 的污染状况以及在主要栽培作物玉米的根、茎、叶、轴心和籽实不同器官中的积累规律。调查结果表明,矿区土壤重金属含量的大小为 Zn>Pb>Cu>Cd;用重金属污染指数对矿区土壤的污染程度进行评价,其污染指数的大小为 Cd>Pb>Zn>Cu,Cd 含量已超过土壤环境质量的三级标准,污染程度最重;重金属在玉米体内的含量为 Pb>Zn>Cu>Cd,4 种重金属元素在玉米不同器官中的积累均为根中含量最高,籽实中最低,玉米籽实中 Cd 和 Pb 分别超出食品卫生限量标准的 1.5 和 2 倍,而 Zn 和 Cu 的含量未超标。

关键词:铅锌矿; 土壤; 重金属; 污染; 玉米; 迁移

中图分类号:S154.4,X825 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)04-0634-04

Translocation Behavior of Heavy Metals in Soil-Plant System

——A Case Study from Qingchengzi Lead-Zinc Mine in Liaoning Province

GU Ji-guang¹, LIN Qiu-qi¹, HU Ren¹, ZHUGE Yu-ping², ZHOU Qi-xing²

(1.Hydrobiology Institute, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Applied Ecological Institute, The Key Lab of Terrestrially Ecological Process, CAS, Shenyang 110016, China)

Abstract: Using a field-survey method, we collected and analyzed contents of heavy metals Cd, Pb, Cu and Zn in soil samples around the Qingchengzi Pb-Zn Mining Area of Liaoning Province. The metal accumulations in various parts including roots, stems, leaves, stem cores and seeds of major crop maize (*Zea mays* L.) were evaluated. The results showed that concentrations of both the selected metals in soils around Qingchengzi and those in plant parts were in good correlations. The concentrations of heavy metals in the soil samples were in an order: Zn>Pb>Cu>Cd, while the pollution indexes of the soil metals in the area were in sequence as Cd>Pb>Zn>Cu. Cd concentrations were over the Soil Environmental Quality Standards Class III, leading serious contamination among the metals tested. Metals in the crop were Cd>Zn>Pb>Cu. Among the various crop parts, the highest concentration was found in roots and the lowest in seeds. The concentrations of Cd and Pb in seed exceeded the Food Safety Standard by 1.5 and 2.0 times, but neither Zn nor Cu was over the standards. This study indicated that bioaccumulation of metals occurs in plants but the extent of accumulation is dependent on the different parts of the plant.

Keywords: herbicide; lead - zinc mining; heavy metals; pollution; translocation

随着铅锌矿的累年开采,生产过程中矿渣、工业粉尘、废水、尾矿中的重金属污染及生态环境问题已严重阻碍农业的可持续发展和危害生物的健康^[1,2]。其

中,露天尾矿的堆放是重金属随着固体废弃物污染土壤环境,进入食物链的主要途径之一^[3-6]。辽宁省青城子铅锌矿是我国最大的铅锌多金属矿山之一,已有 400 年生产历史。长期的开采活动,使矿区的土壤受到不同程度的污染。本文采用野外调查的方法,研究了青城子铅锌矿区的土壤受到的污染情况及生长在裸露尾矿污染的土壤上作物体内的重金属含量,由于污染区植物的重金属含量差异一方面是土壤污染

收稿日期:2004-09-22

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999011808);国家杰出青年科学基金(20225722);中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-SW-416)

作者简介:顾继光(1966—),男,博士。E-mail:tjgg@jnu.edu.cn

状况的直接表征,同时也可以反映相同条件下不同植物及同一植物的不同部位对各种重金属的吸收积累差异与特点,通过以上研究可以确定污染土壤上栽培作物的可利用性,进而可以为当地的土壤污染治理和生态环境保护工作以及控制和减少尾矿中的重金属进入食物链提供科学依据^[5]。

1 矿区自然概况和研究方法

1.1 矿区的自然条件

青城子铅锌矿矿区位于辽宁省凤城满族自治县西北部,由南山、甸南、喜鹊沟、二道沟坑口组成。地理位置为东经 123°37′15″,北纬 40°1′37″,属暖温带湿润-半湿润大陆性季风气候,1 月最低气温为 32.8℃,7 月平均气温为 24.1℃,最高气温为 39.2℃,年平均气温为 7.6℃,全年无霜期 142~163 d,>10℃活动积温 3 300℃~3 400℃,年降雨量 590~670 mm。

1.2 矿区土壤的理化性质

土壤样品取自青城子铅锌矿区附近的 0~20 cm 耕层农田的森林棕壤,其理化性质为:有机质 20.16 g·kg⁻¹、pH=6.94、全氮 1.12 g·kg⁻¹、速磷 17.87 g·kg⁻¹、速钾 125.93 g·kg⁻¹、CaCO₃ 9.83 g·kg⁻¹、CEC 15.47 cmol·kg⁻¹,<0.002 mm 粒径 9.95%、0.002~0.02 mm 粒径 21.47%、0.02~0.2 mm 粒径 42.52%、0.2~2 mm 粒径 26.06%。

1.3 重金属含量测定方法

土壤样品处理:将取回的土壤自然风干,磨碎,过

100 目尼龙筛。

植物样品处理:在 2002 年 10 月,采集在矿区污染土上生长的粮食作物玉米,自来水冲洗干净后,将根、茎、叶、籽实进行分离,60℃~70℃烘干,磨碎。在采集植物样品的同时也采集根区土壤。

以上土壤和植物样品均用高氯酸和硝酸的混合液(1:3)消煮,稀硝酸(5%)定容,使用日立 180-80 型原子吸收光谱测定其 Cd、Pb、Cu、Zn 的含量。

1.4 污染指数(PI)的计算

$PI = \sum Ci/C_0$ 。式中,Ci 代表重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 的浓度;C₀ 代表辽宁省土壤中重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 的背景值,采用环境背景值数据手册的数据^[7]。

2 结果与讨论

2.1 矿区土壤重金属污染状况

由于受自然矿体和开采活动的影响,青城子铅锌矿区南山、甸南、喜鹊沟、二道沟矿区的土壤不同程度受到 Cd、Pb、Cu、Zn 重金属的污染,而且易于通过种植农作物在作物体内富集。受矿石品位的影响,矿石粉尘中重金属含量不尽相同,从表 1 可以看出,各个坑口周边土壤的重金属含量,均为 Zn>Pb>Cu>Cd;但从污染程度来看,用土壤环境质量 GB15618-1995 的二级标准来总体评价青城子铅锌矿矿区单一重金属污染现状发现,南山矿区土壤的 Cd、Pb、Cu、Zn 的含量分别是土壤环境质量的 16.23、1.38、1.07、2.84 倍;甸南矿区为 17.10、1.26、1.12、2.63 倍;喜鹊

表 1 矿区土壤重金属污染状况(mg·kg⁻¹)

Table 1 The contents of soil heavy metals in the mining area (mg·kg⁻¹)

地点	元素	最大值	最小值	极差	平均值	标准差	变异系数/%
南山	Cd	12.88	1.14	11.74	4.87	2.35	48.25
	Pb	397.65	260.73	136.92	345.72	33.57	9.74
	Cu	76.84	41.69	35.15	53.63	6.91	12.89
	Zn	805.50	183.72	621.78	426.37	99.22	23.27
甸南	Cd	9.76	1.35	8.41	5.13	1.39	27.41
	Pb	451.79	207.41	244.38	318.93	57.28	17.96
	Cu	63.84	44.69	19.15	56.21	5.22	9.29
	Zn	667.47	143.57	523.90	395.51	70.63	17.86
喜鹊沟	Cd	10.31	0.93	9.38	4.71	1.37	29.18
	Pb	409.14	189.35	219.79	327.78	52.14	15.91
	Cu	68.12	39.13	28.99	49.27	5.55	11.27
	Zn	692.51	167.89	524.62	407.63	86.70	21.27
二道沟	Cd	8.95	1.52	7.43	4.18	0.79	18.93
	Pb	439.42	231.87	207.55	296.87	59.85	20.16
	Cu	70.35	47.53	22.82	55.23	4.90	8.87
	Zn	763.24	171.89	591.35	441.26	87.96	19.93

注:南山 1、甸南 2、喜鹊沟 3 和二道沟 4 的土壤样品数分别为 20、18、21、25 个。

沟矿区为 15.70、1.31、0.99、2.72 倍;二道沟矿区为 13.93、1.19、1.10、2.94 倍。4 种重金属污染程度的顺序为 $Cd > Zn > Pb > Cu$,且南山、甸南、喜鹊沟和二道沟的 Cd 含量均已超过土壤环境质量的三级标准,见表 2。进一步采用重金属污染指数方法对矿区土壤的污染程度进行评价,4 种重金属在矿区土壤中的污染程度均以 Cd 为最大,其次为 Pb 、 Zn 、 Cu 为最小,见表 3。

表 2 土壤环境质量标准($mg \cdot kg^{-1}$)
Table 2 The standards of soil environmental quality ($mg \cdot kg^{-1}$)

国家标准值	Cd	Pb	Cu	Zn
一级	≤ 0.20	≤ 35	≤ 35	≤ 100
二级	≤ 0.30	≤ 250	≤ 50	≤ 150
三级	≤ 1.00	≤ 500	≤ 400	≤ 500

注:土壤环境质量标准执行 GB15618-1995 的标准。

表 3 矿区土壤重金属污染指数
Table 3 Indexes of the soil heavy metals in the mining area

	Cd	Pb	Cu	Zn
南山	43.48	16.01	2.46	6.58
甸南	45.80	14.76	2.58	6.10
喜鹊沟	42.05	15.18	2.26	6.29
二道沟	37.32	13.74	2.53	6.80

2.2 玉米对矿区污染土壤中重金属的吸收

在土壤-作物系统中,重金属元素迁移是一个极其复杂的过程,其迁移机理受作物的种类、元素组合、相对浓度、比例关系以及环境因素的综合影响^[8]。作物体内重金属含量是土壤重金属污染状况的直接反映,从理论上分析,它较土壤重金属含量更能客观地说明土壤重金属污染对生态系统和人类环境的危害。由于玉米通常具有比其他作物较强的抗旱和抗贫瘠的性能,成为青城子铅锌矿区广泛种植的主要栽培作物品种之一。对矿区栽培玉米不同部位重金属 Cd 含量的测试结果显示,玉米根中 Cd 的含量最高为 $5.31 mg \cdot kg^{-1}$,其次为叶 $1.25 mg \cdot kg^{-1}$,茎、轴心和籽实中的 Cd 的含量分别为 0.68 、 0.27 和 $0.075 mg \cdot kg^{-1}$,见图 1。由此可见, Cd 在玉米中的富集主要在根中,而籽实中最少,其比值达 70.8 倍。玉米籽实中的 Cd 含量超出食品中重金属 Cd 限量标准的 1.5 倍。

Pb 在玉米中不同器官的含量测定结果见图 2。它与 Cd 的测定结果有着一致的趋势,即其在玉米各器官中 Pb 含量的高低顺序为根>叶>茎>轴心>籽实,具体数值分别为 318.42 、 226.73 、 22.95 、 6.87 、 $0.83 mg \cdot kg^{-1}$ 。同样为根中含量最高,而籽实中最少,其根与籽实 Pb 含量比值达 383.63 倍。玉米籽实中 Pb 的含量超出食品中重金属 Pb 限量标准的 2 倍以上。

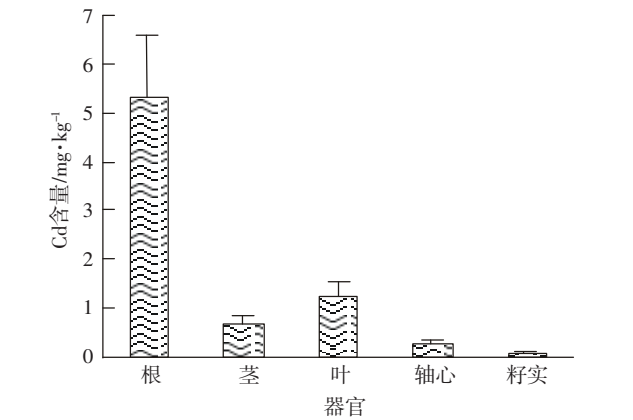


图 1 玉米不同器官 Cd 含量
Figure 1 Cd contents in different organs in maize

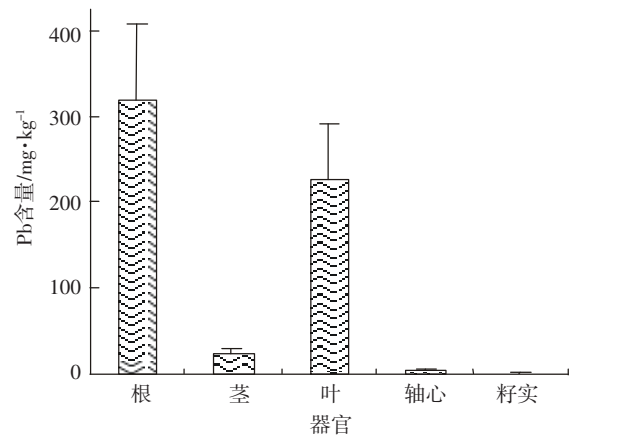


图 2 玉米不同器官 Pb 含量
Figure 2 Pb contents in different organs in maize

Cu 在玉米中不同器官的含量的测定结果见图 3。它与 Cd 和 Pb 在玉米中的分布规律不尽相同。即含量的高低顺序为根>叶>轴心>茎>籽实,其含量分别为 17.38 、 12.37 、 1.43 、 1.21 、 $0.48 mg \cdot kg^{-1}$,同样为根中含量最高,而籽实中最少,其根与籽实 Cu 含量比值达 36.42 倍。玉米籽实中 Cu 的含量未超出食品中

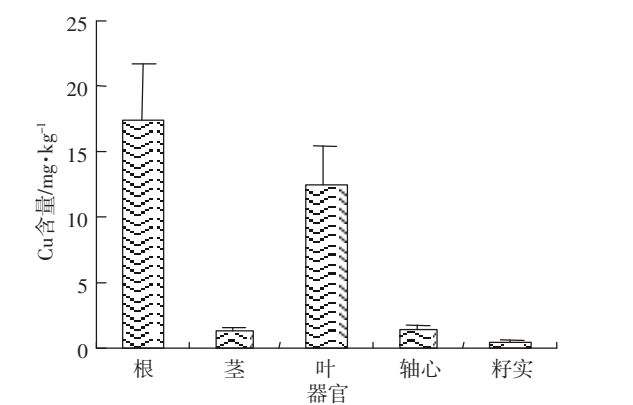


图 3 玉米不同器官 Cu 含量
Figure 3 Cu contents in different organs in maize

重金属限量标准。但其在玉米不同器官中的含量要明显比 Pb 的低,但比 Cd 高,主要与重金属在土壤中的含量及其活度有关。

作物体内某一重金属元素的来源,主要是通过根系被动地从土壤环境中吸收。由于土壤是一个复杂的系统,土壤重金属之间存在着复杂的交互作用,植物对重金属的吸收和体内富集不仅与该元素的含量有关,还与其他重金属含量有着密不可分的联系。Zn 与 Cd 具有相同的核外电子构性型,可相互取代。Cd 进入细胞后,与 Zn 竞争锌酶中 Zn 的结合部位,进而取代锌,使 Zn 酶的活性降低,甚至完全丧失,从而影响植物的正常生长^[9,10]。图 4 为重金属 Zn 在玉米中不同器官的含量的测定结果。结果显示,玉米根、茎、叶、轴心和籽实中的 Zn 的含量分别为 257.12、36.02、81.39、35.55 和 15.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 Cd、Pb、Cu 的分布规律相似,Zn 在玉米器官中的分布为根中最高,其次为叶,籽实中含量最低。Zn 在根与籽实含量比值高达 16.40 倍,但玉米籽实中的 Zn 含量未超出食品中重金属的限量标准。

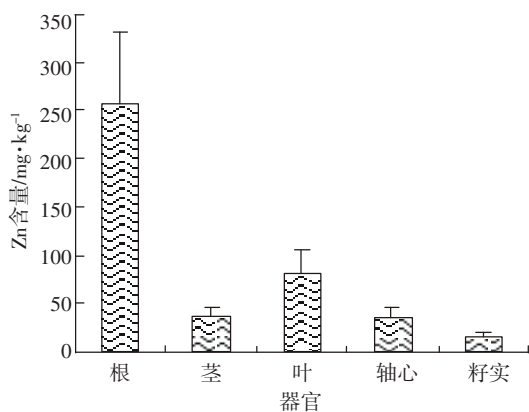


图 4 玉米不同器官 Zn 含量

Figure 4 Zn contents in different organs in maize

人们长期食用含有重金属 Cd、Pb 的农产品,将使记忆力下降、发生智力障碍、引起神经痛,使人体的骨质疏松,患骨折的概率增加^[11]。因此,在这一矿区应调整种植业结构,不种植与人类健康密切相关的农作物,以减少重金属通过食物链的传递对人体健康造成

的危害。

3 结论

(1)辽宁省青城子铅锌矿矿区土壤中 4 种重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 其在土壤中的含量呈现 $\text{Zn}>\text{Pb}>\text{Cu}>\text{Cd}$ 的趋势;而矿区土壤重金属污染指数的大小为 $\text{Cd}>\text{Pb}>\text{Zn}>\text{Cu}$ 。对矿区单一重金属污染现状总体评价发现,青城子铅锌矿土壤的 Cd、Pb、Cu、Zn 的含量都达到土壤环境质量 GB15618-1995 的二级标准。

(2)4 种重金属元素 Cd、Pb、Cu、Zn 在玉米根、茎、叶、轴心和籽实中的积累规律均为根中含量最高,籽实中最低。当地玉米籽实中的 Cd 含量超出食品中重金属 Cd 限量标准的 1.5 倍,Pb 的含量超出食品中重金属 Pb 限量标准的 2 倍以上。

参考文献:

- [1] 周启星,任丽萍,孙铁珩,等. 某铅锌矿开采区土壤镉的污染及有关界面过程[J]. 土壤通报, 2002,33(4):300-302.
- [2] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量 [M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [3] 林炳营. 广西某铅锌矿矿区土壤-作物镉污染研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(5):235-237.
- [4] 尚爱安,党志. 两类型重金属土壤污染研究[J]. 环境科学学报, 2001, 21(4):501-502.
- [5] 张志权,蓝崇钰. 铅锌矿尾矿植被重建的生态学研究[J]. 应用生态学报,1994, 5(1):52-56.
- [6] Jung M C, Thornton I. Heavy metal contamination of soils and plants in the vicinity of a lead-zinc mine in Korea[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11: 53-59.
- [7] 李健,郑春江. 环境背景值数据手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [8] Van Gestel, C.A.M., Hensbergen P J. Interaction of Cd and Zn toxicity for *Folsomia candida* Willem(Collembola: Isotomidae)[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry* 1997,16: 1177-1186.
- [9] 何振立,周启星,谢正苗. 污染及有益元素的土壤化学平衡[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1998.
- [10] 周启星,高拯民. 作物籽实中 Cd 与 Zn 的交互作用及其机理的研究[J]. 农业环境保护, 1994, 13(4): 148-151.
- [11] Oliver M A. Soil and human health :a review [J]. *Europ J Soil Sci*, 1997, 48: 573-592.