

铅锌矿区土壤-植物系统中植物吸收铅的研究

李永华, 杨林生, 姬艳芳, 孙宏飞, 李海蓉, 王五一

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于野外现场系统采样, 结合室内全量、形态含量检测技术, 分析了湘西铅锌矿区几类粮食中铅等元素的质量状况以及水稻植株中铅的吸收和分配。结果表明, 湘西铅锌矿区粮食中存在高铅污染风险, 与对照相比, 矿区稻米、玉米、黄豆等粮食中铅的平均含量分别增加 2.4 倍、1.2 倍和 3.3 倍。粮食铅含量因品种不同、采集部位不同而异, 铅含量由高到低依次为: 黄豆 > 稻米 > 玉米(粮食品种间), 根 > 茎叶 > 籽粒(植株部位间), 稻根对铅表现出极强的束缚力和耐受性。相关分析显示稻根中的铅主要来自土壤, 而水稻地上部分的铅则可能主要源自大气。矿区粮食中汞、镉、铅等多种重金属共同富集, 亟需开展矿区粮食中重金属复合污染的机理及其健康风险研究。

关键词: 铅; 重金属; 土壤-植物系统; 采矿活动; 铅锌矿区

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)01-0196-06

Lead Uptake by Plant in Soil-Plant System at Lead-Zinc Deposit Area of Western Hunan Province

LI Yong-hua, YANG Lin-sheng, JI Yan-fang, SUN Hong-fei, LI Hai-rong, WANG Wu-yi

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Contents of lead in several crops as well as its uptake and distribution by paddy in typical lead-zinc deposit area of western Hunan province were studied based on field systematic sampling and laboratory analysis. The average concentration of lead in rice, maize and soy bean in the deposit was 2.4, 1.2 and 3.3 times higher than that in control area, respectively, suggesting that crops in the deposit were heavily contaminated by the element. Significant difference of the lead concentrations in crops was found among different crop species and different organs of the same crops. The average concentration of lead followed the trend: soy bean > rice > maize (among crop species), and root > haulm > seed (among organs). Paddy root exhibited strong binding and tolerant capacity to lead. Correlation analysis indicated that soil lead was main retention in paddy root, whereas the gaseous lead might be the main source for lead in the aerial part of crop. Heavy metals such as Hg, Cd as well as Pb co-enriched in crops, therefore the mechanism and health risk of the combined pollution of heavy metals in the deposit crops should be paid attention to.

Key words: lead; heavy metal; soil-plant system; mining activity; lead-zinc deposit

铅是世界卫生组织鉴定的毒性极高的神经毒物, 严重危害人体健康^[1], 有色金属矿的开采和冶炼是其进入生物圈的重要途径^[2]。据估算, 近年来全球因采矿和冶炼活动释放进入环境中的铅为 635×10^3 t/a, 占总释放量的 35%^[3,4]。中国是世界上有色金属矿开采和冶炼大国, 矿业的开采和冶炼导致的铅污染十分严重。湘西则是中国铅锌资源最为丰富的成矿区之一, 目前已探明铅锌矿点 120 余处^[5]。频繁而强烈的采选矿活动以及环境治理措施滞后, 导致铅等重金属大量进入陆地表层生态系统, 影响其区域环境质量、粮食安全和居民健康^[6~8]。

目前有关铅的环境行为研究比较关注铅的全球循环及其对生态环境的影响^[9,10], 土壤尤其是根际土壤-作物系统中铅富集及其效应的研究相对薄弱, 而根际土壤-作物-人体系统中铅的迁移转化和累积是影响人类健康的重要暴露途径。作为联系人体内、外环境的纽带, 粮食中的铅含量反映了生态环境中

铅的质量状况, 同时也指示着机体内环境中铅的营养水平。本实验基于现场系统采样, 结合室内全量、形态含量检测技术, 研究了湘西铅锌矿区几类粮食中铅等元素的质量状况以及水稻植株中铅的吸收和分配, 以期开展矿区环境中污染元素的暴露途径和环境毒性分析、采选矿活动对健康风险的影响提供依据。同时, 研究得到的粮食中铅等元素含量的背景数据可为该区环境质量监测与评价提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 工作区的选择

收稿日期: 2007-02-27; 修订日期: 2007-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(40571008); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-437); 中国科学院地理科学与资源研究所三期知识创新工程项目

作者简介: 李永华(1971~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为化学地理、微量元素环境行为与健康效应, E-mail: yhli@igsnrr.ac.cn

选择凤凰县奇梁桥自然风景区为对照、凤凰茨岩铅锌矿区作为典型矿区.该矿区是湘西铅地质储量最大的矿床之一,含大小矿洞 30 余处,至今已有 70 a 的开采历史.采选矿产生的大量尾矿和废矿渣散乱堆放于山谷及小溪两侧阶地.这些矿山固体废弃物长期暴露于与地下环境相异的地表环境中,在水、热、气和人类活动等多因素的综合影响下,通过风化、蚀变、分解等作用释放其所含的重金属进入农田生态系统中,并通过食物链最终危害人体健康.

1.2 样品采集与分析

以茨岩铅锌矿开采场为中心,按生态系物质匹配法采集矿区不同生态功能区的耕作土壤和粮食作物样.耕作土壤采集 0~20 cm 的表层土壤,粮食样包括入户采集的玉米、黄豆样和野外采集的水稻植株样(稻根、茎秆、稻谷).土壤样品剔除砾石和碎根后自然风干,四分法混匀后取约 10 g 于玛瑙球磨机上细碎,过 100 目尼龙筛,储于干燥处备用;植物样品经过预处理后(玉米脱粒/稻谷去壳/剔除杂物及虫粒、植株样用 Teflon 剪刀剪短至 2 mm),清水冲洗表面黏附的土壤及灰尘,去离子水洗净,105℃下烘干,四分法混匀后取约 5 g 于粉碎机中粉碎至过 40 目尼龙筛,储于干燥器中备用.水稻土样按 BCR 三步法将总铅区分为酸交换态、Fe-Mn 氧化态、有机-

硫化态和残渣态 4 种形态^[11].全部样品中 Pb、Hg、As 的测定采用氢化发生-等离子体发射光谱法(HG-ICP-AES)^[12-13],Se 的测定用荧光分光法^[14],Al 等其他 14 种元素的测定用等离子体发射光谱法(ICP-AES)^[15],采用平行样品及国家标准样品(土壤 GBW 07401、杨树叶 GBW 07604 和茶叶叶 GBW 08513)进行质量控制.

2 结果与讨论

2.1 供试土壤的基本性质描述

铅锌矿区土壤与对照土壤中 Pb 含量及土壤基本理化参数的分析结果见表 1.由表 1 可见,矿区和对照区土壤在 pH、有机质和土壤质地组成上呈现微少的差异性(*t* 检验均未达到显著水平),显示矿区和对照区在物质来源上的相同性.但两者 Pb 的平均含量分别为(792.69±507.81) μg·g⁻¹和(59.58±19.33) μg·g⁻¹(*t* 值为 3.51, *p*<0.01),即矿区土壤中 Pb 含量显著高出.与对照相比,矿区铅平均含量增加了 13.3 倍,与中国土壤铅背景值(26 μg·g⁻¹)^[16]相比,矿区土壤铅平均含量增加了 30.5 倍.表明湘西铅锌矿区土壤中物质来源不仅仅局限于自然成因,人为采选矿活动引起的外源输入也深刻影响成矿元素 Pb 的含量和分布.

表 1 供试土壤的基本理化参数及其铅含量¹⁾

采样区	pH	OM/g·kg ⁻¹	土壤质地组成/%			Pb/μg·g ⁻¹
			砂粒	粉砂粒	粘粒	
湘西铅锌矿区	7.09±0.50	22.70±8.75	42.26±14.99	44.71±11.51	13.03±12.63	792.69±507.81**
对照区	7.24±1.09	23.23±11.03	38.77±8.67	45.09±11.29	16.15±10.99	59.58±19.33

1) 铅锌矿区和对照区供试土壤样本数分别为 15 和 6;数值以平均含量±标准差表示; ** 表示 *t* 检验显著性水平达到 *p*<0.01

2.2 粮食中铅的含量及分布

铅锌矿区及对照区中稻米、玉米、黄豆等粮食中 Pb 含量的统计结果列于表 2.由表 2 可知,矿区粮食中铅的平均含量分别为:稻米(1.23±0.55) μg·g⁻¹、玉米(1.02±0.43) μg·g⁻¹、黄豆(2.51±0.69) μg·g⁻¹,分别是对照的 2.4 倍、1.2 倍和 3.3 倍.*t* 检

验结果表明,与对照区相比,矿区稻米、玉米、黄豆中的铅含量明显偏高,其中稻米、黄豆中的铅含量与对照相比差异显著.可见,湘西铅锌矿区粮食中 Pb 的背景含量明显高于对照区,并因粮食品种不同而异,供试粮食中铅含量由高到低的顺序是黄豆>稻米>玉米.

表 2 研究区不同种类粮食中 Pb 的含量¹⁾/μg·g⁻¹

粮食种类	铅锌矿区			对照区			<i>t</i> 检验	
	均值	标准差	样本数	均值	标准差	样本数	<i>t</i> 值	<i>p</i>
稻米	1.23	0.55	15	0.51	0.29	6	3.03	0.007**
玉米	1.02	0.43	14	0.82	0.41	6	0.85	0.415
黄豆	2.51	0.69	8	0.76	0.79	6	3.61	0.007**

1) ** 表示 *t* 检验显著性水平达到 *p*<0.01

对湘西铅锌矿区内粮食中 Pb 含量分布的正态性进行 μ 检验,结果见表 3.由表 3 可见,矿区稻米、玉米和黄豆中 Pb 含量的偏度检验(μ_1)和峰度检验

(μ_2)均未达到显著水平,总体上说,湘西铅锌矿区稻米、玉米、黄豆中的 Pb 含量均接近正态分布.

2.3 土壤-植物系统中铅的传输

表 3 粮食中 Pb 含量分布的正态性检验¹⁾($\mu = 1.960$, $p = 0.05$; $\mu = 2.576$, $p = 0.01$)

Table 3 μ -test for normality for the distribution of Pb concentrations in crops							
粮食种类 ²⁾	g_1	S_{g_1}	g_2	S_{g_2}	偏度检验 μ_1	峰度检验 μ_2	分布描述
稻米	0.674	0.580	1.192	1.121	1.16	1.06	峰度平缓,呈近正态分布
玉米	0.123	0.794	-1.500	1.587	0.16	0.95	峰度超过正态分布,呈近正态分布
黄豆	-1.045	1.014	1.154	2.619	1.03	0.44	曲线右偏,峰度平缓,呈近正态分布

1) g_1 和 g_2 分别代表偏度, S_{g_1} 和 S_{g_2} 峰度和分别代表偏度和峰度的标准误, $\mu_1 = g_1/S_{g_1}$, $\mu_2 = g_2/S_{g_2}$; 2) 稻米、玉米、黄豆的样本数分别为 15、14 和 8

2.3.1 水稻中铅的含量分布

为了解湘西铅锌矿区土壤-植物系统中 Pb 的传输情况,以水稻为例,采集并分析了水稻土-稻根-稻秆(茎叶)-稻米中 Pb 的含量,统计结果列于表 4 中.由表 4 可见,铅锌矿区水稻的各部位均明显地吸收、积累了成矿元素 Pb,与对照相比,矿区稻根 Pb [(300.60 ± 149.20) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$],稻秆 Pb [(11.25 ± 0.98) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$],稻米 Pb [(1.23 ± 0.55) $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$]均值分别增加了 10.5 倍、1.5 倍和 2.4 倍;与此同时,水稻植株内 Pb 的含量分布具有明显的不均一性,根中最高,茎叶次之,籽粒中最低,呈现出自下而上递减的变化趋势.矿区稻根、稻秆、稻米 3 者中 Pb 含量之比约为 244:9:1,稻根对 Pb 具有极强的束缚力和耐受力.

目前对于植物吸收、运输和积累 Pb 的研究甚少,根部积累大量的 Pb 但只有极少部分运输到地上

部.原因可能是稻根通过离子交换、质流运移和根毛表面接触等多种方式从土壤溶液中摄取 Pb,但根系内胚层对 Pb 等重金属元素的通透性较低,当它们从根部向中柱迁移时就会受到内皮层凯氏带的阻拦,导致植物吸收的 Pb 主要累积在根部.此外,在细胞近中性 pH 条件下,Pb 主要以磷酸盐或碳酸盐形式沉淀在根部细胞壁或细胞内^[17].Pb 进入中柱后随蒸腾流被动运输到地上部分,运输过程中 Pb 可能会与中柱内的阳离子交换位点结合,从而被固定在茎部中柱内.研究表明,Pb 可与多种小分子有机物螯合^[18,19],推测 Pb 也有可能和各种小分子有机酸、植物螯合肽结合,减少与阳离子交换点位结合的机会,从而增加进入叶部或籽粒中的数量,但由于稻米是水稻成熟期的产物,也是水稻植株内 Pb 传输的最后环节,因而其 Pb 含量最低.

2.3.2 水稻各部位铅含量与土壤铅含量间的关系

表 4 水稻各部位 Pb 的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 4 Pb concentrations in different organs of paddy at the Pb-Zn deposit and control area/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$								
部位	铅锌矿区			对照区			矿区与对照 Pb 含量 t 检验	
	均值	标准差	样本数	均值	标准差	样本数	t 值	p
稻根	300.60	149.20	15	28.55	15.75	6	3.42	0.042
稻秆	11.25	0.98	15	7.51	6.59	6	0.79	0.511
稻米	1.23	0.55	15	0.51	0.29	6	3.03	0.007

将水稻土中 Pb 含量同稻根、稻秆、稻米中的 Pb 含量进行相关分析,结果表明,稻根 Pb 含量与土壤 Pb 含量显著正相关, $y_{\text{稻根铅}} = 0.272x_{\text{土壤铅}} - 2.969$ ($r = 0.78$, $p < 0.01$),稻秆、稻米 Pb 含量同土壤 Pb 含量间的正相关性均不明显($p > 0.05$).研究表明,土壤中 Pb 的移动性弱、生物有效性低,植物地上部分吸收的 Pb 主要来自大气,通过气孔交换和叶面吸

附直接从大气中吸收重金属并大量富集^[20].因此可以认为,稻根中的 Pb 主要来源于土壤,同稻根相比,稻秆则由于可以通过气孔摄取部分大气中的 Pb,从而减轻了水稻植株地上部分的稻秆、稻米等对土壤 Pb 的依赖.即来自土壤中的 Pb 大都聚集于水稻植株的根部,而来自大气中的 Pb 大多集中于植株的地上部分.

进一步研究稻根、稻秆和稻米中 Pb 的含量同对应土壤中各形态 Pb 含量间的相互关系.发现稻根 Pb 含量同铁锰氧化态 Pb、有机-硫化态 Pb、残渣态 Pb 含量显著正相关,相关系数均为 0.99($p < 0.01$),稻秆、稻米中 Pb 含量则不与任何土壤形态 Pb 存在显著相关性(表 5).可见,稻根能有效利用土壤中铁锰氧化态 Pb 和有机-硫化态 Pb,同时残渣态 Pb 也可能在根系分泌物的作用下部分释放并为稻根所利用.水稻植株的地下部分(稻根)与多种形态 Pb 含量存在显著水平的正相关关系,而其地上部位(稻秆和稻米)中 Pb 含量不与任何土壤形态 Pb 含量显著相关,从另一个侧面佐证了植株地下部分的 Pb 主要来自土壤而地上部分的 Pb 则可能主要源自大气.

土壤和大气是植物摄取铅的 2 个重要场所.在工业性铅污染区,与通过从土壤中摄取的铅相比,植物通过叶片气孔从大气中摄取的铅较多^[21,22].一些研究表明^[23~25],植株地上部位中的铅含量同大气铅含量呈明显相关性.但关于大气铅对植株地上部分铅含量的贡献率,目前尚缺乏实验数据的直接支持,这需要作进一步的研究.

2.4 粮食中铅同其他元素间的关系

2.4.1 粮食中多种元素的含量

表 5 水稻各部位 Pb 含量同土壤各形态 Pb 含量间的相关性检验¹⁾

Table 5 Correlation coefficients of Pb contents between different organs of paddy and Pb species in paddy soils

部位	酸交换态 Pb	铁锰氧化态 Pb	有机-硫化态 Pb	残渣态 Pb
稻根 Pb	0.01	0.99* *	0.99* *	0.99* *
稻秆 Pb	-0.07	0.39	0.32	0.38
稻米 Pb	0.19	0.32	0.09	0.15

1) * * 表示极显著性相关($p < 0.01$); * 表示显著相关($p < 0.05$); 样本数 $n = 15$

不同区域稻米、玉米、黄豆中 Al 等 18 种元素含量的统计结果列于表 6.由表 6 结果可见,铅锌矿区各测试元素的含量在稻米和玉米 2 种粮食中基本相同,其含量遵循如下数量级序列: $P(2 \times 10^{-3}) > Mg(1 \times 10^{-3}) > Ca(0.5 \sim 1 \times 10^{-4}) > Na \approx Fe \approx Zn \approx Mn(1 \sim 2 \times 10^{-5}) > Al(2 \sim 5 \times 10^{-6}) > Cu \approx Pb(1 \sim 2 \times 10^{-6}) > Cr(2 \sim 11 \times 10^{-7}) > As \approx Ni(1 \sim 4 \times 10^{-7}) > Cd \approx V \approx Se \approx Hg(5 \sim 30 \times 10^{-8}) > Co(2 \sim 10 \times 10^{-8})$;与稻米和玉米相比,黄豆中各测试元素的含量总体上有不同程度的增加,其中 Fe、Na、Mg、P、Mn、Ba、Zn 等元素的含量明显增加,而 Ca、Cu、Ni 的含量增加幅度甚至高达 1~2 个数量级.

表 6 研究区不同种类粮食中多种元素的平均含量/ $\mu g \cdot g^{-1}$

Table 6 Concentrations of multi-elements in different crops at the Pb-Zn deposit and control area/ $\mu g \cdot g^{-1}$

区域	粮食种类	样本数	Al	Fe	Na	Ca	Mg	P	Mn	Cu	Zn
铅锌矿区	稻米	15	5.68	17.75	20.06	119.75	1 017	1 982	14.90	1.41	16.90
	玉米	14	2.46	8.56	14.37	75.26	909	1 974	14.78	1.28	19.96
	黄豆	8	3.78	66.61	73.64	2 667	2 361	4 694	29.15	15.76	49.13
对照区	稻米	6	5.68	14.92	18.86	109.45	952	2 334	17.77	1.97	16.26
	玉米	6	5.90	18.85	17.27	65.62	940	1 794	5.91	2.21	18.65
	黄豆	6	10.79	65.54	77.73	2 252	2 202	4 493	24.85	17.01	37.94
区域	粮食种类	样本数	Co	Ni	V	Cr	Cd	Se	As	Hg	Pb
铅锌矿区	稻米	15	0.07	0.36	0.06	1.06	0.12	0.03	0.15	0.06	1.23
	玉米	14	0.05	0.21	0.05	0.22	0.05	0.03	0.08	0.06	1.02
	黄豆	8	0.08	3.68	0.16	0.86	0.18	0.08	0.10	0.25	2.51
对照区	稻米	6	0.25	0.47	0.23	0.67	0.06	0.07	0.25	0.04	0.51
	玉米	6	0.07	0.38	0.26	0.22	0.03	0.02	0.06	0.02	0.82
	黄豆	6	0.09	2.78	0.55	0.42	0.08	0.06	0.11	0.03	0.76

铅锌矿区稻米、玉米、黄豆中各测试元素的丰缺系数(某元素在矿区与对照区粮食中含量的比值)列于表 7.根据丰缺系数由大到小排序,稻米中: $Pb > Cd > Cr > Hg > Fe > Ca \approx Mg \approx Na \approx Zn > Al > P \approx Mn > Ni > Cu > As > Se > Co \approx V$;玉米中: $Hg > Mn > Cd > Se > As > Pb > Ca > P > Zn > Cr > Mg > Na > Co > Cu > Ni > Fe > Al > V$,黄豆中: $Hg > Pb > Cd > Cr > Se \approx Ni >$

$Zn > Ca \approx Mn > Mg > P \approx Fe > Na \approx Cu \approx As \approx Co > Al > V$.与对照相比,铅锌矿区:稻米中 Pb、Cd、Cr、Hg 等明显富集(丰缺系数分别为 2.41、2.00、1.58、1.50),V、Co、Se 等明显亏损(丰缺系数分别为 0.26、0.28、0.43);玉米中 Hg、Mn、Cd、Se 等明显富集(丰缺系数分别为 3.00、2.50、1.67、1.50),V、Al、Fe 等明显亏损(丰缺系数分别为 0.19、0.42、0.45);黄豆中 Hg、Pb、Cd、Cr 等明显富集(丰缺系数

分别为 8.33、3.30、2.25、2.05), V、Al 等明显亏损(丰缺系数分别为 0.29、0.35)。

为了综合评价元素在铅锌矿区粮食中的丰缺情况,采用 18 分制对 2 类矿区粮食中 18 种测试元素的含量进行评分。在每一类粮食中将元素按丰缺系数大小排序,丰缺系数最大的元素得 18 分,以后分值依次减 1,分别得到稻米、玉米、黄豆等 3 种粮食中各元素的得分(表 7);然后,将每一种元素在稻米等 3 种粮食中的分值相加计算该元素的最后得分,分值愈高表示该元素在粮食中的富集度愈高,分值愈低意味着该元素在粮食中的亏损度愈高。运用这一评分系统,铅锌矿区各元素的综合得分为: Hg (51)、Cd(49)、Pb(48)、Cr(40)、Ca(36)、Mn(34)、Zn(32)、Se(32)、Mg(29)、P(27)、Fe(24)、Na(24)、Ni(23)、As(22)、Cu(15)、Al(13)、Co(11)、V(3)。可见,在铅锌矿区粮食中,伴随 Pb 含量高异常的是元素 Hg、Cd、Cr 等明显富集, V、Co、Al 等明显亏损。

表 7 不同种类粮食中 Al 等 18 种测试元素的丰缺系数及得分情况
Table 7 Enrichment coefficient and factor score of the study elements in various crops compared with the control area

元素	丰缺系数			因子得分		
	稻米	玉米	黄豆	稻米	玉米	黄豆
Al	1.00	0.42	0.35	9	2	2
Fe	1.19	0.45	1.02	14	3	7
Na	1.06	0.83	0.95	11	7	6
Ca	1.09	1.14	1.18	13	12	11
Mg	1.07	0.97	1.07	12	8	9
P	0.85	1.10	1.04	8	11	8
Mn	0.84	2.50	1.17	7	17	10
Cu	0.72	0.58	0.93	5	5	5
Zn	1.04	1.07	1.29	10	10	12
Co	0.28	0.71	0.89	2	6	3
Ni	0.77	0.55	1.32	6	4	13
V	0.26	0.19	0.29	1	1	1
Cr	1.58	1.00	2.05	16	9	15
Cd	2.00	1.67	2.25	17	16	16
Se	0.43	1.50	1.33	3	15	14
As	0.60	1.33	0.91	4	14	4
Hg	1.50	3.00	8.33	15	18	18
Pb	2.41	1.24	3.30	18	13	17

2.4.2 粮食中铅同多种元素含量间的因子分析

为进一步探讨矿区粮食中 Pb 同其他元素间的相互关系,以湘西居民主要消费的主粮——稻米为例,应用 STATISTICA® 6.0 用最大方差旋转法(varimax rotation)对稻米中 18 种测试元素进行主成分因子分析。根据元素的主成分因子分析结果——因子载荷绘制成因子分布图(图 1)。由图 1 可见,矿区稻米中 18 种元素明显分为 4 区: Hg、Fe、Pb、Cd、

Al、Na 共同构成第 1 区; Ni、Cu、P、Zn、Mn、Ca、Mg 组成第 2 区;元素 As、Se、Co、V 形成第 3 区;而元素 Cr 单独构成第 4 区,独立于其他 3 区之外,表明矿区粮食中元素的来源和分布受多种因素的控制,即矿区粮食中物质来源具有多源性。需要引起关注的是 1 区中重金属 Hg、Cd、Pb 间的这种共生组合关系。一方面,湘西铅锌矿区粮食中 Hg、Cd、Pb 等可能有共同的物质来源;另一方面,基于矿区粮食中 Hg、Cd、Pb 等异常高含量的事实,今后需要开展矿区粮食中重金属 Hg、Cd、Pb 等联合污染的健康风险研究。

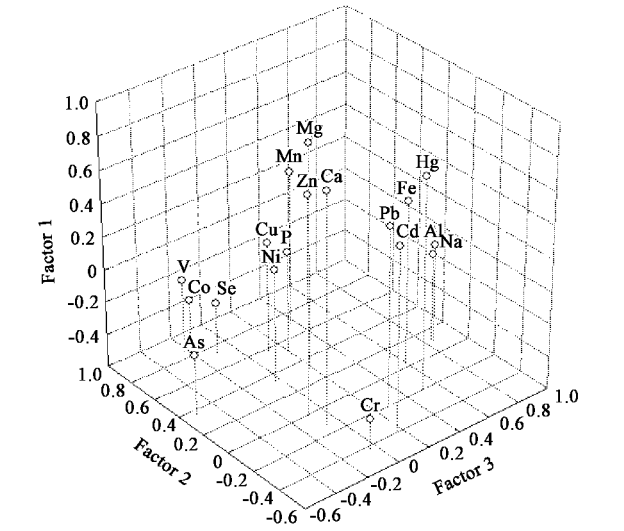


图 1 铅锌矿区稻米中元素的因子载荷分布
Fig.1 Projection of the factor loadings of variables on the factor-plane after varimax rotation

3 结论

- (1)湘西铅锌矿区粮食中存在高 Pb 污染风险,并因粮食品种不同而异。与对照相比,矿区稻米、玉米、黄豆等粮食中 Pb 的平均含量分别增加 2.4 倍、1.2 倍和 3.3 倍;不同品种粮食中 Pb 含量由高到低的顺序为:黄豆>稻米>玉米。
- (2)铅在水稻植株内呈不均匀分布,根中最高,茎叶次之,籽粒中最低,呈现出自下而上递减的变化趋势;稻根、稻秆、稻米三者中 Pb 含量之比约为 244:9:1,稻根对 Pb 表现出极强的束缚力和耐受性。
- (3)相关分析发现,稻根 Pb 与根际土壤中铁锰氧化态 Pb、有机-硫化态 Pb、残渣态 Pb 含量存在显著正相关关系,而稻秆和稻米中 Pb 含量不与任何土壤形态 Pb 含量显著相关,提示植株地下部分的 Pb 主要来自土壤而地上部分的 Pb 则可能主要源自大气。

(4)矿区粮食中伴随 Pb 含量高异常的是 Hg、Cd、Cr 等明显富集,V、Co、Al 等明显亏损.今后需要开展矿区粮食中重金属 Hg、Cd、Pb 等联合污染的机理及其健康风险研究.

参考文献:

[1] WHO/IPCS. Inorganic lead[M]. Geneva: WHO/IPCS, 1995.

[2] WBG. Pollution prevention and abatement handbook [M]. Washington: World Bank Group, 1998. 215-218.

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

[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 Pollu, 2004, **152**: 129-152.

[5] 杨绍祥. 湘西铅锌矿找矿前景分析[J]. 湖南地质, 2003, **22** (2): 107-111.

[6] 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.

[7] 李永华, 姬艳芳, 杨林生, 等. 采选矿活动对铅锌矿区水体中重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(1): 103-107.

[8] 李永华, 杨林生, 李海蓉, 等. 湘黔汞矿区土壤汞的化学形态及污染特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 654-658.

[9] MPCA. Legislative report on sources and effects of lead presented to the committees on the environment and natural resources[M]. Minnesota: Minnesota Pollution Control Agency, 1998.

[10] Gobeil C, Macdonald R W, Smith J N, *et al.* Atlantic water flow pathways revealed by lead contamination in Arctic basin sediments [J]. Science, 2001, **293**: 1301-1304.

[11] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. J Environ Monit, 1999, **1**: 57-61.

[12] 李永华, 杨林生, 王丽珍, 等. 基于 BCR 和 HG-ICP-AES 的矿区

土壤重金属污染特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, **27** (9): 1834-1836.

[13] 王丽珍. HG-ICP-AES 测定生物样品中的汞[A]. 见: 西南师范大学编. 分析化学的成就与挑战[C]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2002. 153-154.

[14] 侯少范, 王五一. 微量硒的测定方法简介[J]. 分析化学, 1980, **8**(2): 183-187.

[15] 王丽珍. 高频感耦等离子体发射光谱法测定毛发、粮食中多种元素[J]. 分析化学, 1989, **17**(9): 847-850.

[16] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.

[17] Liu D, Jiang W, Liu C. Uptake and accumulation of lead by roots, hypocotyls and shoots of Indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. Bioresour Technol, 2000, **71**(3): 273-277.

[18] Vassil A D, Kapulnik Y, Askin L, *et al.* The role of EDTA in lead transport and accumulation in Indian mustard[J]. Plant Physiol, 1998, **117**(2): 447-453.

[19] Leopold I, Gunther D, Schmidt J, *et al.* Phytochelatins and heavy metal tolerance[J]. Phytochemistry Oxford, 1999, **50**(8): 1323-1326.

[20] 黄会一, 张春兴, 张有标. 木本植物对大气重金属污染物铅、镉吸收积累作用的初步研究[J]. 林业科学, 1982, **18** (1): 93-97.

[21] 郑路, 常江. 合肥市菜园蔬菜和土壤的铅污染调查[J]. 环境污染与防治, 1989, **11**(5): 33-37.

[22] 李泽琴, 程温莹, 罗丽, 等. 成都市某蔬菜基地重金属污染状况分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, **13**(4): 24-27.

[23] 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.

[24] Zheljaskov V D, Nielsen N E. Effect of heavy metals on peppermint and commint[J]. Plant Soil, 1996, **178**: 59-66.

[25] 陈学泽, 谢耀坚, 彭重华. 城市植物叶片金属元素含量与大气污染的关系[J]. 城市环境与城市生态, 1997, **10**(1): 45-47.