

典型矿业城市的土壤重金属分布特征 与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例

廖晓勇, 陈同斌*, 武 斌, 阎秀兰, 聂灿军, 谢华, 翟丽梅, 肖细元

(中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101)

摘要:通过对甘肃省金昌市(镍矿城市)建成区的土壤重金属调查研究,揭示了其重金属来源、污染现状及其环境风险。结果表明:当地主要矿产品 Ni 和 Cu 两种重金属的土壤污染最严重,与《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的 III 级标准比较,样品 Ni 和 Cu 的超标率分别为 70%和 57%,污染面积分别为 26 km²和 24 km²;土壤 As 和 Cd 污染主要集中在矿冶区和尾砂库附近,居民区土壤污染程度低;土壤 Cr 污染出现在尾砂库和采矿区附近,污染面积为 3 km²。在城区土壤中,Co、Cu、Cd、Pb 与 Zn 的污染来源及空间分布具有相似特征,而土壤 As 污染与 Ni 污染特征相近。Nemero 综合指数评价结果表明,高风险区域主要分布在东部矿冶区、北部尾砂库和西南角采矿区,城市居民区的土壤重金属污染水平较低。

关键词:矿业城市;土壤;重金属;污染;评价

文章编号:1000-0585(2006)05-0843-10

1 前言

城市土壤(土地)是受人类活动强烈影响的一类特殊土壤^[1,2],其环境质量与众多人口的身体健康密切相关,因而一直受到广泛关注。城市土壤重金属污染研究工作始于 20 世纪 60 年代^[3],其研究内容包括:城市化过程对土壤重金属含量变化的影响;城市环境污染源识别^[4];土壤环境质量与健康风险评估等。国际上已开展纽约^[5]、伦敦^[6]、汉堡^[7]、曼谷^[8]等城市的调查工作,通过研究在一定程度上了解了这些城市的土壤污染风险,并确定其主要污染源及途径。

近年来,我国北京^[9]、香港^[10]、上海^[11]、南京^[12]等地也陆续开展了城市土壤重金属研究工作。郑袁明等^[13]通过对北京市 30 个典型公园调查发现,公园土壤的铅污染程度与人类活动密切相关,其中,建园时间长且距离市中心较近的公园土壤铅浓度明显偏高。北京城区土壤的铅浓度高于近郊区,近郊区又明显高于远郊区,有从城市中心区向外逐渐降低的趋势^[14]。通过对香港九龙的调查发现^[15],交通工具为当地的主要污染源,土壤重金属 Cu、Ni、Pb 和 Zn 密切相关且来源相似;另外,在老工业区出现重金属明显积累的现象,这应该与“三废”排放有关。目前已基本证实,人类活动如工矿业废弃物排放、垃圾填埋、农药施用以及交通等是城市土壤重金属的重要污染源,城市化进程加剧了土壤重金

收稿日期:2006-01-18;修订日期:2006-04-23

基金项目:国家杰出青年基金项目(40325003);国家自然科学基金资助项目(40232022)

作者简介:廖晓勇(1977-),男,湖南衡阳人,博士,主要从事重金属污染土壤的植物修复研究。

Email:liaoxy@igsrr.ac.cn.

*通讯作者:陈同斌,研究员,博士生导师。Email:chentb@igsrr.ac.cn

属积累。

已有的城市土壤和土地环境质量研究主要是针对人口密集的大中城市进行的，而对另一类可能存在着严重的土壤重金属污染的矿业城市却关注甚少。我国矿业城市所占比重较大，全国共有 95 个矿业城市，占全国城市总数的 14.4%，其中有色金属城 13 个^[16]。虽然许多学者对矿业城市的大气环境质量、水环境质量和固体废弃物排放等问题进行过大量深入和系统的研究，发现这些矿业城市大气、水环境污染问题十分突出。针对矿业城市土壤重金属污染也有零星研究^[17,18]，但遗憾的是，对矿业城市的土壤重金属污染特征及源分析至今缺乏系统研究。有鉴于此，本文以我国最大的镍生产基地——甘肃省金昌市为研究对象，揭示矿业城市土壤重金属的空间变化特征、污染状况、污染源及其环境风险。

2 材料与方法

2.1 研究区域的基本概况与样点分布

甘肃金昌市是中国最大的镍钴铜生产基地，被誉为中国的“镍都”，其镍的储量占全国总储量的 63.9%。金昌市建于 1982 年，建成区面积 34.9 km²，市区总人口 18 万。自 20 世纪 60 年代开发以来，由于采用先生产后建市的发展思路，城市布局不规范，工业区与住宅区没有隔离带。金川有色金属公司的老尾矿库位于金昌市北部，占地约 3.15 km²，在 1964~1991 年间，老尾矿库中共储存尾矿 3877 万 t^[19]。据不完全统计，至 1991 年底，金川铜镍矿开发利用生产过程中，每年排放工业废水 2000 多万 t（其中达标量仅约 700 万 t），工业废气约 130 亿 m³，废渣中尾矿渣 151.9 万 t、冶炼熔渣 55.9 万 t。1996~1999 年，年均排放工业废气总量更是高达 219 亿 m³^[20]。

在金昌市的建成区内住宅区、矿冶工业区、采矿区及尾砂库附近等区域每 1 km² 左右布一个点，调查面积为 32 km² 左右，共采集表层土壤（0~10 cm）30 个，取样点以 GPS 精确定位，样点位置如图 1 所示。

2.2 分析方法

土壤样品自然风干，剔除样品中的植物根系、有机残渣以及可见侵入体，用木质工具碾碎并用玛瑙研钵研磨，分别过 20 目和 100 目尼龙筛。采用 HNO₃ 和 H₂O₂ 消煮^[21]。用原子吸收光谱法（AAS Vario 6）测定 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn^[9]。用氢化物发生-原子荧光法（AFS-2202）测定 As 浓度^[22]。分析过程中所用的试剂均为优质纯。加入国家标准物质样品 GSS-1 和 GSS-2 作为未知样品的测定以进行分析质量控制，各种元素测定值均在国家标准参比物质的允许误差范围内。

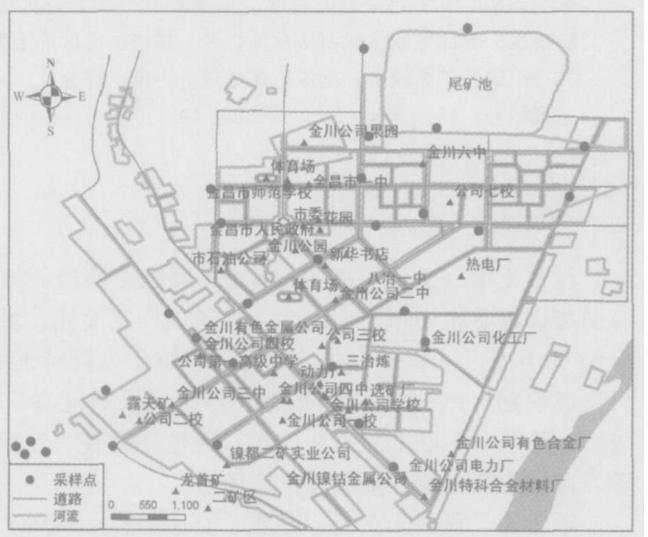


图 1 取样点分布图

Fig. 1 A sketch map showing the sampling sites

2.3 土壤环境质量评价方法

土壤重金属环境质量评价的临界值分别以我国《土壤环境质量标准》(GB15618-1995)的 III 级标准以及 VROM 推荐的 Co 标准为参照^[23](表 1)。土壤污染综合评价采用 Nemerlo 综合指数法。其计算式为:

$$P = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2}{n} + (\max P_i)^2}}{2} \quad \text{其中, } P_i = C_i / S_i$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的浓度 (mg/kg); S_i 为污染物 i 的评价标准临界浓度 (mg/kg) $\max P_i$ 为土壤中各污染指数最大值; $P < 1$ 为非污染; $1 < P < 2$ 轻度污染; $2 < P < 3$ 中度污染; $P > 3$ 重污染。

2.4 数据处理与作图

数据相关分析、聚类分析和主成分分析用 SPSS11.0 完成。采用克立格 (Kriging) 法计算土壤重金属和 Nemerlo 综合指数的差值, 由 ArcGIS9.0 软件完成差值图的绘制。

3 结果与分析

3.1 土壤重金属浓度

金昌市城区 8 种土壤重金属浓度的基本统计数据见表 1。土壤 Ni 和 Cu 浓度的平均值

表 1 金昌市城区土壤重金属的基本统计结果 (mg/kg)

Tab 1 Descriptive statistics of heavy metal concentrations in the Jinchang urban soils

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
最小值	6.2	0.30	17.1	33.3	122.5	79.4	20.1	68.3
最大值	189.8	5.93	195.6	854.6	10320.9	6102.1	148.6	259.2
中值	13.9	0.82	34.4	66.4	473.4	276.4	31.6	102.4
平均值	30.9	1.11	58.9	197.4	1226.3	910.3	40.3	118.0
标准偏差	45.5	1.04	44.2	244.0	2293.4	1258.5	27.9	45.8
变异系数	147%	94%	75%	124%	187%	138%	69%	39%
偏度	2.85	3.75	1.26	1.62	3.37	2.74	2.76	1.56
峰度	7.54	16.52	1.47	1.49	11.12	9.43	7.96	2.35
曼谷 ^[8]	-	-	-	26	42	25	48	118
大马士革 ^[24]	-	-	13	57	34	39	17	103
香港 ^[25]	-	0.94	-	-	16	-	90	59
北京 ^[26]	8.4	0.15	-	36	27	28	30	70
甘肃土壤背景值 ^[27]	12.6	0.116	12.6	70	24.1	35.2	18.8	69.3
土壤环境质量标准 三级 GB15618-1995	40	1		300	400	200	500	500
Tentative Netherlands Soil Quality Criteria ^[23] B level	30	5	50	250	100	100	150	500

[8] Wilcke et al., 平均值, 表层土壤 0~5cm, n=30; [24] Möller et al., 平均值, 表层土壤 0~25cm, n=51;

[25] Chen et al., 平均值, 表层土壤 0~5cm, n=58; [26] 郑表明, 平均值, 表层土壤 0~20cm, n=772;

[27] 中国环境监测总站, 平均值, 表层土壤 0~20cm, n=76; [23], 采用 VROM 推荐 B 标准, 即对人体健康有潜在危害的临界值。

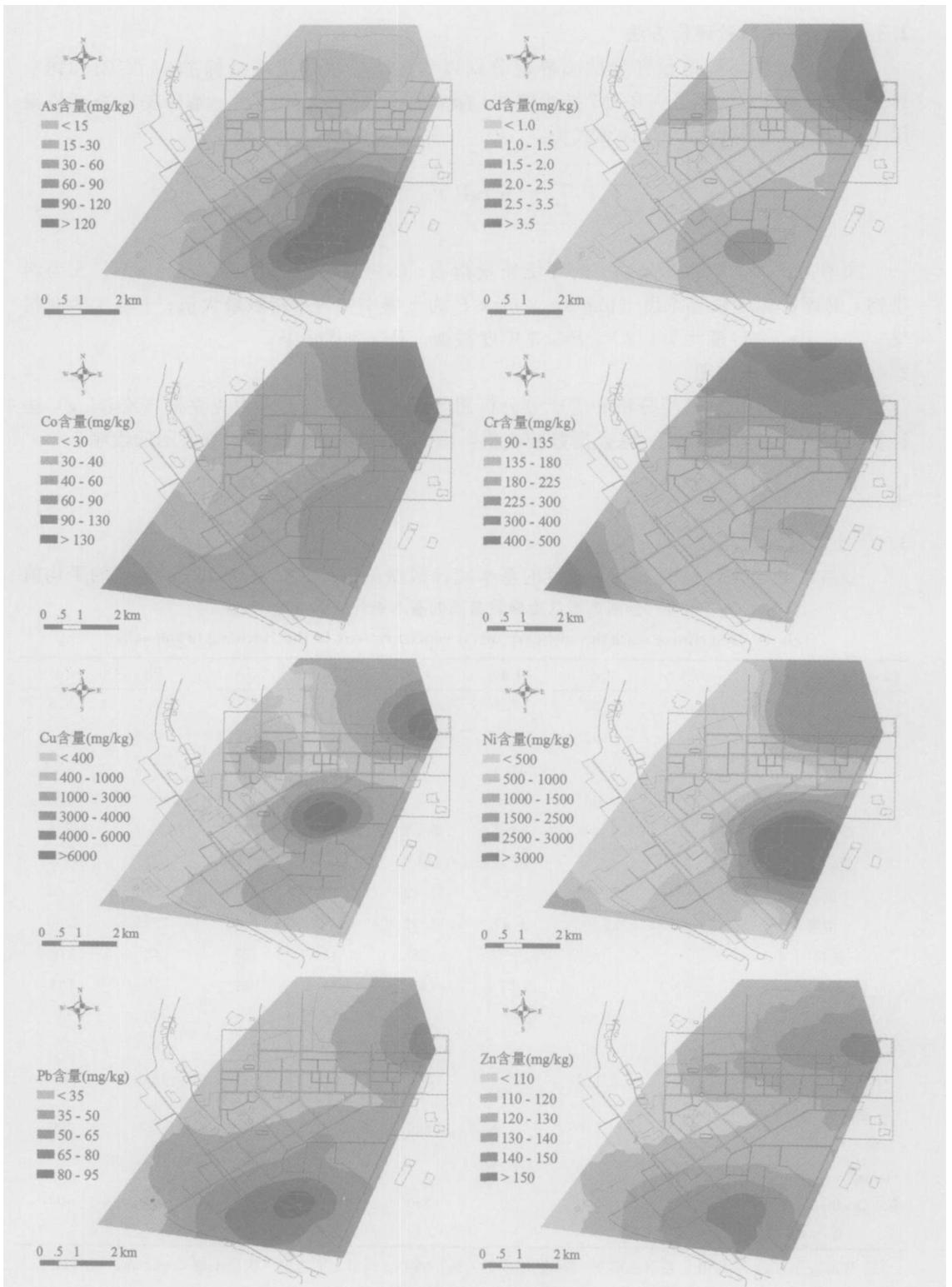


图 2 土壤重金属空间分布图

Fig. 2 The distribution map showing spatial variation of soil pollution by heavy metals

超过《土壤环境质量标准》III级标准；土壤 As 和 Co 浓度的平均值超过“Tentative Netherlands Soil Quality Criteria”B 标准；其他元素的平均值均未超过上述两个标准。土壤重金属的变异系数以 Ni 为高；其次是 As、Cu 和 Cr；而 Zn、Pb、Co 和 Cd 的变异系数均小于 1。

土壤中 Ni 和 Cu 的最大浓度超过《土壤环境质量标准》III级标准的 30 倍和 25 倍，超标率分别为 70%和 57%。与《土壤环境质量标准》III级标准相比，As 超标的样品占 13%，Cd 超标的样品占 33%，Cr 超标的样品占 23%，而与“Tentative Netherlands Soil Quality Criteria”B 标准比较，超标率样品分别为 27%、3%和 27%。Pb 和 Zn 的最大值都未超过《土壤环境质量标准》III级标准和“Tentative Netherlands Soil Quality Criteria”B 标准。

3.2 城区土壤重金属空间分布

图 2 所示为基于 GIS 的土壤重金属 As、Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 分布图。由图中元素的扩散特征分析发现，金昌城区中部和西部居民集中区域的土壤重金属浓度较低，高环境风险区主要有三个：一是东北方尾砂库及北部河流一带；二是选冶厂区集中带；三是西南角的采矿区附近。

Ni 和 Cu 的超标（Co 以 VROM 推荐临界值为标准，其他元素参照《土壤环境质量标准》III级标准，下同）面积最大，分别为 26km² 和 24 km²，占调查区域总面积的 80%和 75%。Co 在整个东部土壤都有非常高的浓度，采矿区附近也有富集，超标面积为 18 km²，占调查区域总面积的 57%。

土壤 Cd 超标面积为 17 km²，它与 Cu 和 Ni 呈相似的分布，高浓度区域集中在东北角和选冶厂工业区带。土壤 As 在选冶厂工业区出现明显累积，超标面积为 11 km²，最高神浓度达 128mg/kg，其他区域都未超过《土壤环境质量标准》III级标准。

土壤 Cr 超标区域主要分布在采矿区附近和尾砂库周围，超标面积 3 km²左右。土壤 Pb 和 Zn 浓度在南部和东北角略有升高趋势，其他区域都非常低，并无超标现象。从各重金属超过 III级标准的污染面积来看，其由大到小分别为：Ni > Cu > Cd > As > Cr。

3.3 土壤重金属的统计分析

土壤重金属含量的相关性分析结果显示（表 2）：As 与 Ni、Pb 和 Zn 达显著相关性。Co 与 Cu、Ni 和 Cr 极显著相关，与 Pb 和 Zn 有显著相关关系。除 As 和 Cr 外，Cu 也与其它重金属显著相关。Pb、Zn 和 Cd 三种重金属呈极显著的相关关系。图 3 所示为金昌城区土壤聚类分析结果。按照距离为 10 作为分类的标准，8 种待测的重金属可分三类，I 类：Co、Cu、Cd、Pb 和 Zn；II 类：As 和 Ni；III 类：Cr。

对 8 种重金属进行主成分分析发现，在因子的初始矩阵中，Cd、Co、Cu、Pb、Zn 及 Ni、As 在因子 1 中显示出较高的因子负荷，Cr、Ni 在因子 2，As 在因子 3 中分别表现出较高的值（表 3）。经正交旋转使复杂的因子负荷矩阵变得简洁表明，因子 1 包含 Cd、Cu、Pb、Zn 和部分 Co；因子 2 包含 Cr 和部分 Co；因子 3

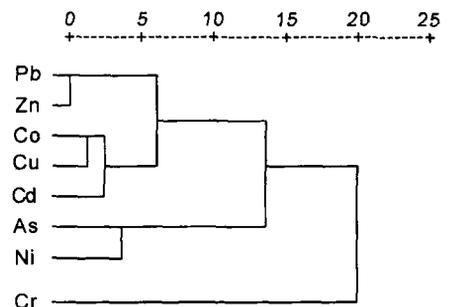


图 3 聚类分析图

Fig 3 Dendrogram of cluster analysis based on correlation coefficients using furthest neighbour linkage method

包含 Ni 和 As。根据因子分析的特征值结果,三个主成分的累积贡献率超过 85 %。

表 2 重金属的相关性分析

Tab 2 Correlation between different coefficients of availability of heavy metal

	As	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1							
Cd	0.195	1						
Co	0.220	0.732 **	1					
Cr	0.006	0.048	0.477 **	1				
Cu	0.356	0.703 **	0.735 **	-0.053	1			
Ni	0.667 **	0.281	0.624 **	0.456 *	0.461 *	1		
Pb	0.548 **	0.715 **	0.432 *	-0.238	0.630 **	0.180	1	
Zn	0.362 *	0.665 **	0.440 *	-0.068	0.442 *	0.132	0.812 **	1

*相关性为 0.01 显著性水平, *相关性为 0.05 显著性水平。

表 3 主成分分析

Tab 3 Matrix of principle component analysis loadings of heavy metals of Jinchang urban soils

	旋转前的因子 (主成分) 提取结果			旋转后的因子 (主成分) 负荷矩阵		
	1	2	3	1	2	3
As	0.583	0.086	0.790	0.220	-0.032	0.960
Cd	0.844	-0.171	-0.378	0.920	0.196	-0.018
Co	0.821	0.387	-0.357	0.684	0.687	0.105
Cr	0.139	0.848	-0.248	-0.116	0.887	0.012
Cu	0.833	-0.047	-0.110	0.777	0.216	0.240
Ni	0.605	0.651	0.374	0.162	0.624	0.717
Pb	0.819	-0.483	0.119	0.855	-0.259	0.347
Zn	0.740	-0.407	-0.062	0.816	-0.150	0.170
贡献率	50.3 %	21.6 %	14.1 %	42.5 %	22.8 %	20.7 %

3.4 土壤重金属环境质量综合评价

目前,我国尚未建立土壤污染控制标准,本文采用 Nemerlo 综合指数法,以《土壤环境质量标准》和《Tentative Netherlands Soil Quality Criteria》推荐的 Co 标准为准,对城区土壤重金属环境质量进行综合评价,其结果见图 4。城区的大面积居民区(图 1 所示的中心地带)综合指数 $P < 1$,属未污染;小部分居民区 $1 < P < 3$,属中轻度污染。严重污染区域($P > 4$)均分布在工业区、北部尾砂库及采矿区附近。Nemerlo 综合指数超过 1 的面积为 25 km², 占总调查区域的 78 %。对比 Nemerlo 综合指数评价结果和 Ni 土壤空间变异特征,发现二者有明显的相似性,这表明 Ni 对研究区土壤重金属环境质量的贡献率极大,是金昌城区土壤重金属污染的最主要控制因子。

4 讨论

4.1 城区土壤重金属的环境风险

金昌矿区蕴藏着中国最大的铜镍硫化物矿床,超镁铁质岩为该矿床的赋存岩体, Ni 和 Cu 是该矿业城市的主要矿产品。金昌市城区土壤重金属浓度为北京^[26]、香港^[25]等大

城市土壤重金属的数倍甚至数十倍，其中在 8 种重金属中尤以 Ni 和 Cu 的污染问题最为突出，其最高浓度分别达到 6102mg/kg 和 10321mg/kg (表 1)，达到《土壤环境质量标准》中 III 级标准的 31 和 26 倍。由此可见，长年的矿冶活动导致城区土壤 Ni 和 Cu 浓度极高，成为金昌城区土壤环境中污染风险最大的两种元素。不过，土壤重金属污染比较严重的区域主要集中在东部工业区、北部尾砂库及西南角采矿区附近，居民区除 Ni 和 Cu 污染较重以外，其他重金属污染程度较低 (图 4)。

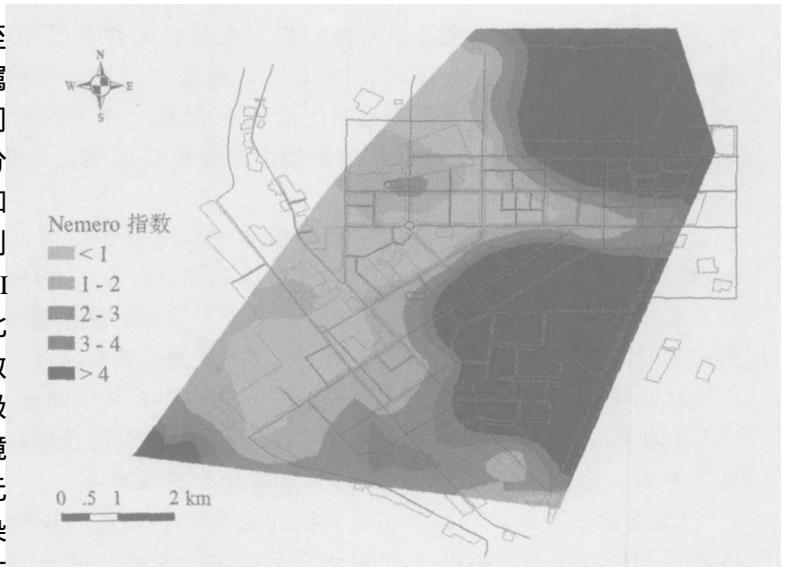


图 4 Nemerlo 综合指数评价图

Fig. 4 The distribution map showing spatial variation of Nemerlo index

采用 Nemerlo 综合指数评价结果表明，大部分住宅区的综合指数 $P < 1$ ，小部分住宅区 $1 < P < 3$ 。因此，住宅区的土壤污染环境风险较低，但这并不意味着金昌城区居民处于非常安全的环境中。譬如：金川公司一校、金川公司三校、金川二中和金川六中等学校都处于高风险区域。该地区年主导风向为西北风，年频率达 30%。选冶等厂矿工业区虽处于住宅区的下风向，但尾砂库却位于上风向。金昌地区东南风居第二，年频率达 21%。刮东南风时选冶工业区处在居民区上风向。金昌工业区和住宅区划分并不清晰，两者之间也无明显的隔离带，这使得工业区的污染物容易迁移到住宅区。虽然从工业区过渡到住宅区，土壤的重金属浓度迅速下降 (图 2)，但由于当地沙尘天气较多，受重金属污染的土壤可通过扬尘等方式迁移到住宅区，并进一步通过呼吸系统进入人体。在正常天气和沙尘天气下，金昌城区的降尘中 Cu、Ni、As 和 Cd 分别为：612 和 165、149 和 3029、9.9 和 3.5、0.5 和 0.4 kg/月·km² [28]。扬尘中含有如此高浓度的重金属对人 (尤其是儿童) 存在着极大的健康威胁。对金昌镍矿 2.6 万名职工的流行病学调查结果表明，癌症发病率非常高，癌症标化死亡率比全国平均高 0.27 ($p < 0.01$) [29]。因此，采取合理措施防止和治理金昌城区土地 (壤) 重金属污染已迫在眉睫。

4.2 土壤重金属来源分析

从土壤重金属分布特征 (图 2 和图 4) 可以推断，土壤重金属主要来源于东部矿冶活动、北部尾砂库和西南角的采矿。随着离污染源的距离增加重金属浓度急剧下降，这与我们在对湖南郴州因矿冶活动导致的污染特征大致类似 [30]。Ni、Cu、Co、Cr 四种重金属都是岩体富集元素，虽然它们之间密切相关 (表 2)，但因矿冶过程中工艺流程的不同，导致其土壤分布特征和规律的明显差异 (图 3 和表 3)。金昌城区土壤中其他 4 种重金属的主要来源和空间分布差异都与矿业开采和冶炼活动有紧密联系。

土壤 As 浓度相对较高，显著高于北京和英国的纽卡斯尔城区平均 As 浓度 (20mg/kg) [31]。统计分析结果表明 (表 2、表 3 和图 3)，As 和 Ni 在土壤中表现出强烈的相关

性,有着相似的分布特征并且来源相近。在采矿区和老尾砂库附近,As 累积现象并不明显,高砷区主要集中在冶炼区,因此,Ni 的冶炼活动是导致土壤 As 浓度升高的直接原因。金昌虽以硫化型金属矿为原料生产 Ni,但是近年来外购含砷高的原料加工^[32],冶炼烟气中含有较高浓度的 As^[28]。冶炼烟尘中砷排放可能是导致金昌城区土壤 As 浓度升高的重要原因。

通过对土壤重金属浓度的聚类分析和主成分分析发现,土壤中 Cd、Co、Cu、Pb 和 Zn 有相似的来源或相近的释放规律(表 3 和图 3)。Cu 和 Co 是金昌的矿产品之一,在矿石中含量相当高。这两种金属元素在尾砂库、采矿口和冶炼区等矿业活动密集区附近土壤的积累是非常明显的(图 2)。金昌市土壤 Cd 的浓度略高于香港土壤,与伍尔弗汉普顿的工业区土壤 Cd 浓度(平均值 1.2mg/kg)接近^[31],其空间分布与 Cu 非常相似,很可能是在 Cu 的采冶过程中释放到土壤中。Pb 和 Zn 在工业区及尾砂库附近虽有提高,但变化幅度并不大,这应是与矿石中这两种元素都相对较低有关。

Cr 是在金昌镍矿岩体中明显富集的元素^[30],在矿石中浓度较高,因此导致其在采矿区附近和尾砂库周围累积。Cr 由于在矿石中含量高、回收率低等原因,造成其在土壤的独特分布。聚类分析的结果也证明 Cr 在土壤中分布特征有别于其他金属元素。

这些研究表明,矿业城市的土壤重金属污染往往是多种金属污染共存的污染:主产金属的品位高、开采时间较长,容易导致严重的环境危害,然而,部分有害伴生、低价金属如 As、Cd、Cr 等的环境污染问题也不容忽视。

5 结论与建议

金昌市建成区的土壤重金属 Ni 和 Cu 环境问题最为突出,其次是 Cr 和 Co,As 和 Cd 污染主要集中在工业区和尾砂库附近,Pb 和 Zn 没有明显的污染。土壤重金属主要来源于东部矿冶活动、北部尾砂库和西南角采矿。土壤重金属的空间分布特征和 Nemero 综合评价结果都说明,城区高污染风险区集中分布在矿冶区、尾砂库和采矿区,住宅区土壤重金属污染风险相对较低。

现场调查发现,金昌采矿区和老尾砂库的植被覆盖率偏低,污染物容易迁移扩散,建议选择合适物种进行植被复垦以固定土壤重金属。

本研究结果表明,冶炼区周边土壤不仅主产品金属元素含量高,其他金属元素也有明显富集现象。由此可见,在矿产品冶炼和加工过程中,要加强“三废”的管理和处置,提高有害元素 As、Cd 等的回收率。

由于土壤环境风险高的区域主要是集中在矿业活动密集区即采矿区、尾砂库和冶炼区,因此,住宅区和学校等应远离上述这些区域,尽量建在西部或西部偏北区域,这样不仅土壤环境风险小,空气质量也相对较好。

参考文献:

- [1] Kimpe D C R, More J L. Urban soil management: a growing concern. *Soil Science*, 2000, 165 (1): 31 ~ 40.
- [2] 张甘霖,朱永官,傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应. *生态学报*, 2003, 23 (3): 539 ~ 546.
- [3] Kelly J, Thornton I, Simpson P R. Urban Geochemistry: A study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and nonindustrial areas of Britain. *Applied Geochemistry*, 1996, 1: 363 ~ 370.

- [4] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, *et al.* Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *Science of the Total Environment*, 2002, 300: 229 ~ 243.
- [5] Pouyat R V, McDonnell M J. Heavy metal accumulations in forest soils along an urban-rural gradient in southeastern New York, USA. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 57-58: 797 ~ 807.
- [6] Culbard E B, Thornton I, Watt J, *et al.* Metal contamination in British urban dusts and soils. *Journal of Environmental Quality*, 1988, 17: 226 ~ 234.
- [7] Lux W. Long-term heavy metal and As pollution of soils, Hamburg, Germany. *Applied Geochemistry*, 1993, 2: 135 ~ 143.
- [8] Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, *et al.* Urban soil contamination in Bangkok: heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. *Geoderma*, 1998, 86: 211 ~ 228.
- [9] 郑袁明, 陈同斌, 郑国砥, 等. 不同土地利用方式对土壤铜积累的影响—以北京市为例. *自然资源学报*, 2005, 20(5): 690 ~ 696.
- [10] Li X D, Poon C, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 1361 ~ 1368.
- [11] 巫和昕, 胡雪峰, 张国莹, 等. 上海市宝山区土壤重金属含量及其分异特征. *上海大学学报(自然科学版)*, 2004, 10(4): 400 ~ 405.
- [12] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123 ~ 126.
- [13] 郑袁明, 余轲, 吴泓涛, 等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价. *地理研究*, 2002, 21(4): 418 ~ 424.
- [14] 郑袁明, 陈同斌, 陈煌, 等. 北京市不同土地利用方式下土壤铅的积累. *地理学报*, 2005, 60(5): 791 ~ 797.
- [15] Li X, Lee S, Wong S, *et al.* The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach. *Environmental Pollution*, 2004, 129: 113 ~ 124.
- [16] 樊杰, 孙威, 傅小锋. 我国矿业城市持续发展的问题、成因与策略. *自然资源学报*, 2005, 20(1): 68 ~ 77.
- [17] 叶玉瑶, 张虹鸥, 谈树成. 个旧城区土壤中重金属潜在生态危害评价. *热带地理*, 2004, 24(1): 14 ~ 17.
- [18] 南忠仁, 李吉均, 张建明, 等. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究. *环境污染与防治*, 2002, 24(3): 170 ~ 173.
- [19] 丛自立. 金昌市尾矿沙漠化土地的综合治理. *中国沙漠*, 1997, 17(3): 317 ~ 321.
- [20] 赵雅芳. 金昌市污染源达标现状分析. *甘肃环境研究与监测*, 2000, 13(4): 222 ~ 223.
- [21] USEPA. Method 3050B - Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils, 1996.
- [22] Liao X Y, Chen T B, Xie H, *et al.* Soil As contamination and its risk assessment in areas near the industrial districts of Chenzhou City, Southern China. *Environment International*, 2005, 31: 791 ~ 798.
- [23] VROM. Leidrand Bodemsanerings-Guidelines for Soil Clean Up-Netherlands Ministry of Housing, Planning and Environment, Soil, Water and Chemical Substances Department. The Hague, Netherlands. 1983.
- [24] Möller A, Müller H W, Abdullah A, *et al.* Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta. *Geoderma*, 2005, 124: 63 ~ 71.
- [25] Chen T B, Wong J W C, Zhou H Y, *et al.* Assessment of trace metal distribution and contamination in surface soils of Hong Kong. *Environmental Pollution*, 1997, 96: 61 ~ 68.
- [26] 郑袁明. 土壤重金属区域分异规律及风险评估的理论与方法—以北京市为例. 中国科学院研究生院博士学位论文. 2003.
- [27] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [28] 李田玲, 赵雅芳, 马兰, 等. 金昌市沙尘暴中重金属 Ni、Cu、Pb、Cd、As 分布及污染分析. *中国环境管理*, 2004, 2: 51 ~ 52.
- [29] 王英祥, 徐新春, 李惠兰, 等. 某镍矿肿瘤流行病学调查. *工业卫生与职业病*, 1992, 18(3): 153 ~ 155.
- [30] 邓津辉, 史基安, 王琪, 等. 金川镍矿含矿岩体的稀土元素及微量元素地球化学特征. *矿物岩石*, 2003, 23(1): 61 ~ 64.
- [31] Rimmer D L, Vizard C G, Pless-Mulloli T, *et al.* Metal contamination of urban soils in the vicinity of a municipal waste incinerator: One source among many. *Science of the Total Environment*, 2006, 356: 207 ~ 216.
- [32] 王中月. 高镍、砷、铋阳极铜的电解精炼实践. *有色金属(冶炼部分)*, 2004, 6: 19 ~ 20.

Mining urban soil pollution : concentrations and patterns of heavy metals in the soils of Jinchang , China

LIAO Xiao-yong , CHEN Tong-bin , WU Bin , YAN Xiu-lan , NIE Can-jun ,
XIE Hua , ZHAI Li-mei , XIAO Xi-yuan

(Center for Environmental Remediation , Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research ,CAS , Beijing 100101 , China)

Abstract :As is known , urban soil has an important effect on the urban sustainable development and its contaminations have been paid more and more attention. To investigate the impact of mining activities on soil contamination and environmental risk , the present study was undertaken as a preliminary survey on an urban scale in Jinchang , Northwest China. Because of mining and smelting , the soils were severely contaminated by Ni and Cu , 70 % and 57 % of which in samples exceeded the limit values (GB15618 - 1995 III). The soil contaminated areas with Ni and Cu were estimated to be 26 and 24 km² , respectively. Cd and As concentrations in urban soils exhibited the anthropogenic induced increasing values around industrial districts and tailing pools. Fortunately , the values were in most cases below tolerable values of soil in the residential areas. The Cr contaminated soils were mostly distributed in places near tailing pools and mining areas.

According to the results of statistical analysis , heavy metals were classified into three groups: 1) Co , Cu , Cd , Pb and Zn ; 2) As and Ni ; and 3) Cr. The major sources for the heavy metal contamination in Jinchang city are released from the smelting industrial district to the east of the city , tailing pools to the north of the city and mining district to the south west of the city , to which the highest concentrations of heavy metals are generally located. Based on heavy metals in the soils investigated , the results of Nemero index assessment suggested that the health risk in the residential areas seems to be of minor importance. However , direct ingestion of soil and inhalation of dust coming from seriously contaminated areas may contribute largely to the accumulation of heavy metals in human bodies.

Key words :mining city ; soil ; heavy metal ; pollution ; assessment