

Characters and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Soil of Chinese Brownfield Redevelopment Site*

——Case of Tiexi Old Industrial Area, Shenyang City

Wanxia Ren¹, Bing Xue¹, Zhixiao Ma^{1,2}, Yong Geng¹, Li'na Sun³, Yunsong Zhang⁴

¹Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³Shenyang Key Laboratory of Environmental Engineering, Shenyang University, Shenyang

⁴Dalian University of Technology, DUT Faculty of Management and Economics, Dalian
Email: renwanxia@iae.ac.cn, xuebing@iae.ac.cn

Received: Aug. 15th, 2012; revised: Aug. 28th, 2012; accepted: Sep. 8th, 2012

Abstract: Research about heavy metal soil pollution and its potential ecological risk in brownfield redevelopment sites is an important frontier issue in environmental fields. Concentrations and accumulation of heavy metals (Cu, Cd, Pb, Zn, Hg, As, Ni and Cr) in surface soil (0 - 20 cm) were collected from an area of about 29 km² in the Tiexi Old Industrial Area of Shenyang City and analyzed over 71 soil samples. The reference value of the Site Environmental Evaluation Guideline and the environmental background values of Shenyang city were used to analyze the coefficient and rates beyond the soil standard then the Müller land accumulation index and Håkanson potential ecological risk index methods were applied to assess the ecological risk of the studied brownfields. The results showed that whilst the average concentrations for As and Cr were not anomalous from background values, the average concentrations of Cu, Cd, Pb, Zn, Hg and Ni in the soil were higher than their background values. This indicates obvious accumulation effects and the accumulated order for these metals was Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > Ni. The concentrations of some As samples exceeded the threshold value of the guideline. Moreover, the heavy metal average concentrations in different functional zones were significantly over the background values, especially in industrial, business and residential and traffic zones. It was deemed that industrial activities and transportation have been the main factors that influenced the soil quality in the case study area. According to the potential ecological risk assessment of heavy metal soil pollution, the case study area owned extremely strong ecological harm, in which Cd especially showed extremely strong ecological risk. As well as this, Hg indicated strong risk, and other metals for slight risk. In summary, the soil of the Tiexi Brownfield Redevelopment Site was polluted by mixed heavy metals, especially by Cd, Hg and As. These metals should therefore be the most important pollutants to be considered to be remediated.

Keywords: Urban Soil; Heavy Metal Pollution; Potential Ecological Risk; Brownfield Redevelopment Site; Tiexi District

老工业搬迁区土壤重金属污染特征及潜在生态风险*

——以沈阳铁西老工业区为例

任婉侠¹, 薛冰¹, 马志孝^{1,2}, 耿涌¹, 孙丽娜³, 张云松⁴

¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳

²中国科学院研究生院, 北京

³沈阳大学沈阳环境工程重点实验室, 沈阳

⁴大连理工大学管理与经济学部, 大连

*资助项目: 国家科技支撑计划(2011BAJ06B01); 国家自然科学基金(41101126, 71033004); 科技部中德国际合作项目(2011DFA91810); 国际合作项目“Urban Co-benefits Research”; 沈阳市科技局项目(F10-238-6-00)。

摘要: 老工业区搬迁区土壤重金属污染及其潜在生态风险是环境领域的重要前沿问题。本研究以沈阳市土壤元素背景值和《场地环境评价导则》中居住用地标准作为参比值, 对沈阳市铁西老工业搬迁区表层(0~20 cm)土壤中 8 种重金属 Cu、Cd、Pb、Zn、As、Hg、Ni 和 Cr 的含量及富集情况进行调查, 探讨了城市老工业搬迁区土壤重金属的富集系数及超标率, 并结合 Müller 地累积指数法和 Hakanson 潜在生态风险指数法对污染状况进行潜在生态风险评估。结果表明, 与沈阳市土壤背景值相比, 铁西老工业搬迁区土壤重金属累积效应显著, 除 As 和 Cr 外, 其它重金属平均含量均超过其背景值, 重金属的富集顺序为 $Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > Ni$; 部分采样点土壤中 As 含量超过《场地环境质量导则》中限制, 是主要的场地修复金属类型; 不同功能各种重金属的平均含量均高于其背景值, 其中仅以绿地重金属累积最少, 工业区、商住区和交通区累积较为严重, 工业活动和交通运输已成为影响研究区土壤环境质量的主要因素; 研究区土壤具有极强的重金属污染潜在生态危害, 其中 Cd 为极强潜在生态危害, Hg 为强潜在生态危害。综上所述, 铁西老工业搬迁区土壤重金属复合积累显著, Cd, Hg 和 As 将是该区域土壤重金属修复的重点污染物。

关键词: 城市土壤; 重金属污染; 潜在生态风险; 老工业搬迁区; 铁西区

1. 引言

近年来, 随着城市化进程的不断加快及产业集聚化发展的迫切需要, 出现了以搬迁改造为主要手段的“腾笼换鸟”、“退二进三”、“东搬西建”等一系列产业结构调整及土地利用转换等现象, 其主要措施就是将位于城区的污染企业从城市中心迁出, 通过极差地租为城市发展提供了大量的资本支持, 但其伴随的结果是产生了大量污染场地(又称为“棕地” Brownfields), 使得搬迁区的土壤污染问题成为区域可持续发展和宜居环境建设的首要桎梏^[1]。例如, 2000~2005年, 江苏省共有 400 家化工企业搬出城区^[2], 在 2010 年置换出 30 万亩土地^[3]。这些场地的存在带来了双重问题: 一方面是环境和健康风险; 另一方面是阻碍了城市建设和地方经济的发展^[4]。城市污染场地的管理和修复已经成为世界性的环境难题, 而中国在相关领域的研究和实践才刚刚起步^[3]。

铁西工业区位于辽宁省沈阳市西部, 正式建区于 1938 年, 其前身是 1937 年开工建设的占地 40 平方公里的铁西工业复兴团地; 1948 年 11 月沈阳解放后, 铁西被列入重点改造工业区; “一五”、“二五”期间, 国家将六分之一的财力倾注于铁西, 逐步建立了以制造业为基础的工业基地, 被誉为“共和国长子”;

20 世纪 80 年代中后期开始, 作为传统工业区的铁西可持续发展矛盾突出, 环境污染严重, 呈现出明显的衰落趋势。2002 年, 铁西区开始实施大规模的“东搬西建”工程, 启动了老工业区的调整和改造, 到 2012 年, 铁西区搬迁企业 320 户, 腾迁土地 9 km², 盘活闲置资产 500 亿元, 彻底解决了阻碍国有企业发展的冗员、债务等问题, 为现代企业制度、现代工业体系的建立创造了条件^[5]。然而对于“东搬西建”后遗留的大批受到不同程度污染的土地, 其置换开发不可避免的面临严重的生态环境及健康风险。目前, 一些研究者对城市重金属污染土壤进行研究^[6-10], 但是针对工业城市特别是城市老工业搬迁区的土壤污染研究尚未见报道。因此, 以沈阳市铁西老工业搬迁区土壤为例, 对其重金属污染状况及潜在生态风险进行研究, 对城市老工业搬迁区土地的置换再开发具有极其重要的现实意义。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

沈阳市铁西老工业搬迁区土壤样品采集时间为 2011 年 7 月~10 月, 采用全球卫星定位系统(GPS)定位, 结合搬迁区面积大小、土地利用类型、企业性质

和土壤污染类型,在铁西区建设大路以北和北一马路以南约 29 km²的土地进行布点采样,共采集 71 个样品,采样点分布如图 1 所示。根据网格内地块特征,在每个网格内按照梅花形取五份等量土混匀,土层深度为 0~20 cm,混合均匀后装入自封聚乙烯袋中密封,带回课题组实验室。样品在室温下自然风干,剔除碎石、植物残体等杂质,采用 4 分法取出约 1/4 磨碎,过 2 mm 塑料土筛,4℃下密封保存待测。

2.2. 分析测试方法

样品中 $\omega(\text{Hg})$ 和 $\omega(\text{As})$ 经 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-HNO}_3$ 法消解,用冷原子荧光法测定;样品中的 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 采用 $\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4 + \text{HF}$ 三酸消化,采用原子吸收分光光度法(AAS)(Spectr AA 240, Varian, USA)测定; Cr^{+6} 采用紫外分光光度法测定。分析过程采用超纯水,利用国家标准土壤参比

物质(GSS-2)、平行样和空白样进行质量控制,结果符合质控要求。

2.3. 数据处理

数据处理及分析在 Excel 2007、PASW Statistics 18.0 和 SigmaPlot 10.0 平台下完成。

3. 结果与讨论

3.1. 测定结果

待测样品分析测试结果见表 1。由表 1 可知, Cu、Cd、Pb、Zn、Hg 和 Ni 平均含量均超过其背景值,分别为背景值的 5.36、13.2、4.18、4.49、3.67 和 3.08 倍,重金属的富集顺序为 $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Ni}$,表现出显著的累积效应; As 虽然其平均含量低于背景值,但是有若干采样点浓度高于背景值;除 Cr

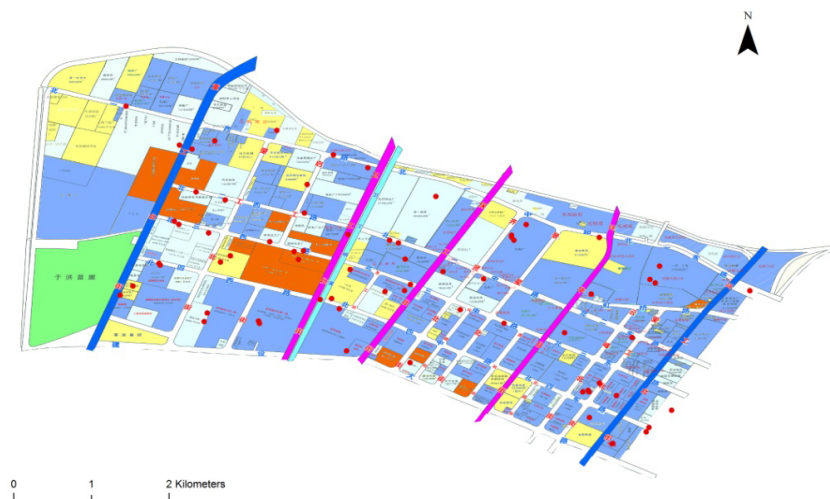


Figure 1. Distribution of sampling sites in Tiexi old industrial brownfields

图 1. 铁西老工业搬迁区土壤采样点分布

Table 1. Analytical results of heavy metals in soil samples ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

表 1. 土壤样品中重金属含量测定结果($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

元素	含量变幅	平均值 \pm 标准差	中值	背景均值 ¹⁾	场地标准(居住用地) ²⁾
Cu	21.3~1180	95.46 \pm 143.57	58.85	17.8	2500
Cd	0.081~30.5	1.32 \pm 3.57	0.42	0.10	75
Pb	0~625	114.96 \pm 106.90	84.5	27.5	600
Zn	28.5~1948.5	265.50 \pm 300.10	190.4	59.1	20,000
As	3.87~109	11.25 \pm 11.71	9.26	11.65	35
Hg	0.018~1.10	0.22 \pm 0.27	0.13	0.06	7
Ni	1.40~218.7	64.49 \pm 40.00	52.45	20.95	1470
Cr	0.00~2.90	0.89 \pm 0.733	0.712	84.25	66,000

¹⁾中华人民共和国土壤环境背景值图集。北京:中国环境科学出版社,1994。²⁾场地环境评价导则,北京市环境保护局,2007。

以外的7种重金属含量高于背景值的样品数量分别占总样品数量的100%、98.6%、88.7%、98.6%、26.8%、28.2%、88.7%和94%；而对金属Cr来说，所有采样点浓度均低于背景值，可能与土壤本身累积效应不显著有关，也可能与现土壤经过新土置换处理有关。从最高值来看，Cu、Cd、Pb、Zn、As、Hg和Ni最高值分别达1180、30.5、625、1948.5、109、1.1和218.7 mg·kg⁻¹，分别为背景值的66.3、305、22.7、33.0、9.4、18.3和10.4倍；这些最高值若与《场地环境评价导则》中土壤环境质量标准相比，冶炼厂采样点土壤中金属As含量是场地标准值的3.1倍，虽然冶炼厂土壤已经经过修复处理，但是冶炼厂及其周边区域仍是铁西区需要加强后续监管的污染场地。

表2为研究区域采样点测定值异常区域对照表，由表可知，Cd、Zn、As和Ni最小值出现在交通区，Cu和Pb出现在工业区和绿地，Hg最小值出现在商业区；Cu、Zn和Hg最大值出现在工业区，Pb异常最大值出现在交通区，Cd、As和Ni最大值出现在商住区，但是这些采样点原址是原沈阳冶炼厂，由此可见，工业活动对现在土地利用方式的土壤环境质量的的影响仍然较显著。

表3为不同功能区7种重金属的污染情况，由表可见，各功能区7种重金属的平均值含量均高于其背景值，其中仅以绿地重金属累积情况最小，工业区、商住区和交通区重金属累积皆较为严重，特别是工业区，根据沈阳市相关规划，这部分工业区后续大部分将变成商住区和绿地等用地类型，虽然铁西区政府已经对这些区域土壤进行了前期处理，但是从目前来看，这些区域仍然存在较显著的重金属累积效应。目前，对已经转变成商住用地类型的区域来说，其重金属含量仅次于工业区，已经存在较为显著的生态环境及人体健康风险。综上所述，铁西老工业搬迁区土壤重金属累积效应显著，且许多区域为复合金属累积，受多重潜在污染胁迫，这对由工业功能转变为商住功能的老工业搬迁区来说，具有很强的潜在生态风险。

3.2. 老工业搬迁区重金属污染土壤的潜在生态风险

目前，重金属污染风险评价方法种类很多，其中Müller地累积指数评价和Häkanson潜在生态危害指

数法考虑到重金属在土壤中的地球化学行为及环境毒性差异等因素，二者结合应用能较为合理地对土壤重金属污染状况进行系统评价^[11,12]。

3.2.1. 重金属污染程度

Müller于1969年提出地累积指数(The index of geoaccumulation, I_{geo})概念，本研究采用 I_{geo} 定量评价铁西搬迁区土壤中7种重金属的污染程度，将土壤重金属污染程度分为7级，

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n) \quad (1)$$

式中， C_n 为元素实测含量， B_n 为该元素背景含量。

如表4所示，供试土壤样品中均有污染分布，其中Cu的地累积指数级数为0~6级，即从无污染区到极重污染区均有分布，分布较为广泛；其中地累积指数在>0~1、>1~2和>2~3的样品数量分别为29、24和10个，占样品数总量的40.85%、33.80%和14.1%，即土壤中Cu主要为轻度污染，中度污染和重度一重污染，表明搬迁区土壤中Cu污染不仅分布广泛，且较为严重；金属Pb、Zn、Hg和Ni的地累积指数主要集中在>0~1和>1~2，即土壤Pb、Zn、Hg和Ni主要的

Table 2. The land use type of the pollutant concentrations owning max and mini values (mg·kg⁻¹)
表2. 污染物异常值区域对照(mg·kg⁻¹)

元素	最小值	最小值区域	最大值	最大值区域
Cu	21.30	工业区	1180.00	工业区
Cd	0.081	交通区	30.50	商住区
Pb	0.00	工业区和绿地	625.00	交通区
Zn	28.50	交通区	1948.50	工业区
As	3.87	交通区	109.00	商住区
Hg	0.018	商住区	1.10	工业区
Ni	1.40	交通区	218.70	商住区

Table 3. Heavy metal pollution in different land use functional zone
表3. 不同功能区7种重金属的污染程度

类型	Cu	Cd	Pb	Zn	As	Hg	Ni
工业区	151.72	1.02	146.53	316.06	12.31	0.40	82.96
商住区	90.22	2.25	87.91	251.40	13.50	0.17	52.87
交通区	64.44	1.17	121.20	289.16	10.24	0.21	43.08
绿地	60.48	0.85	60.25	173.70	11.69	0.15	73.23
背景值 ¹⁾	17.8	0.1	27.5	59.1	11.65	0.06	20.95

¹⁾中华人民共和国土壤环境背景值图集。北京：中国环境科学出版社，1994。

Table 4. Numbers of sample per grade of Müller geo-accumulation indexes for heavy metals in soil
表 4. 土壤中重金属地累积指数及每级样品数

分级	污染程度	地累积指数(I_{geo})	每级样品数量/个						
			Cu	Cd	Pb	Zn	As	Hg	Ni
0	无污染	≤ 0	4	5	12	1	61	15	13
1	轻度污染	$>0\sim 1$	29	23	22	30	9	34	38
2	中度污染	$>1\sim 2$	24	25	23	31	0	9	16
3	中度污染 - 重污染	$>2\sim 3$	10	0	10	5	1	6	4
4	重污染	$>3\sim 4$	2	9	4	2	0	7	0
5	重污染 - 极重污染	$>4\sim 5$	1	6	0	2	0	0	0
6	极重污染	>5	1	3	0	0	0	0	0

为轻度污染和中度污染；供试土壤样品中 As 的地累积指数 ≤ 0 的数量为 61 个，占样品总量的 85.92%，即土壤中 As 主要为无污染，仅有采于冶炼厂的土壤样品 As 地累积指数 $>2\sim 3$ ，为中度污染 - 重度污染；Cd 的地累积指数除 $>2\sim 3$ 范围未有分布外，其余范围均有分布，与其它金属相比，重度以上污染程度($I_{geo} > 3$) 样品数量明显增加，共 18 个，占总样品数量的 25.35%，其余主要集中于轻度污染和中度污染，分别占总样品数量的 32.39%和 35.21%，表明铁西老工业搬迁区土壤 Cd 污染最为严重，这与铁西区工业类型与企业分布有关。

3.2.2. 污染区的潜在生态风险

基于土壤重金属含量地累积指数分析结果，选择铁西老工业搬迁区土壤污染区作为潜在生态风险分析区域，采用潜在生态危害指数法(Potential Ecological Risk Index, RI)进行评价，其计算公式如下^[13]：

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (3)$$

$$C_f^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i \quad (4)$$

式中， E_r^i 为单一金属潜在生态风险参数； T_r^i 为重金属 i 的毒性系数，反应其毒性水平和生物对其污染敏感程度，7 种重金属(Cu、Cd、Pb、Zn、As、Hg 和 Ni)的毒性相应系数分别为 5、30、5、1、10、40 和 5^[14]； RI 为多金属潜在生态风险指数； C_f^i 为单项污染参数； $C_{\text{表层}}^i$ 为表层土壤重金属浓度实测值； C_n^i 为土壤背景参考值，采用沈阳市土壤元素背景值(表 3)。

根据式(2)~(4)，以沈阳市土壤元素背景值为参照

的计算结果如图 2 所示，1~23[#]为商住区土壤采样点，24~48[#]为交通区土壤采样点，49~67[#]为工业区土壤采样点，69~71[#]为绿地采样点，72[#]为平均值。由图可见，搬迁区土壤采样点中单种重金属的潜在生态危害以 Cd 的潜在生态风险最强，其 E_r^i 的平均值达到 438，1(金地名京，居民区，原为沈阳特变电厂，紧邻原沈阳冶炼厂)、21(原沈阳冶炼厂，现建为商住区)、24(交通区)、33(交通区)、36(交通区)、39(交通区)、62(工业区，耐火材料厂)和 65 号(工业区，第四橡胶厂)采样点的 E_r^i 均超过 1000，特别是 21 号(原沈阳冶炼厂，现建为商住区)采样点其潜在生态危害系数高达 9150，达到了极强的潜在生态风险，并且 21 号采样点为现正建成商住区，将对土壤生态系统及周边居民会产生极强的潜在风险，其它采样点如 8(在建居民区，原为沈阳第一皮革厂)、17(光明新村，居民区)、23(原沈阳冶炼厂，商住区)、25(交通区)、35(交通区)、38(交通区)、57(沈阳红梅味精厂，工业区，规划为广场及公园)、58(塑料制品厂，工业区)、64(沈阳热电厂，工业区)、69(建设公园，绿地)等其 E_r^i 均超过 600，表明铁西老工业搬迁区土壤具有极强的 Cd 潜在生态危害；

Table 5. Grade standard of E_r^i and RI ^[15,16]

表 5. E_r^i 和 RI 的分级标准^[15,16]

潜在生态风险参数 E_r^i	单因子污染物生态风险程度	潜在生态风险指数 RI	总潜在生态风险程度
≤ 40	轻微	≤ 150	轻微
40~79	中度	150~299	中度
80~159	较强	300~600	强
160~320	强生	>600	极强
>320	极强		

老工业搬迁区土壤重金属污染特征及潜在生态风险

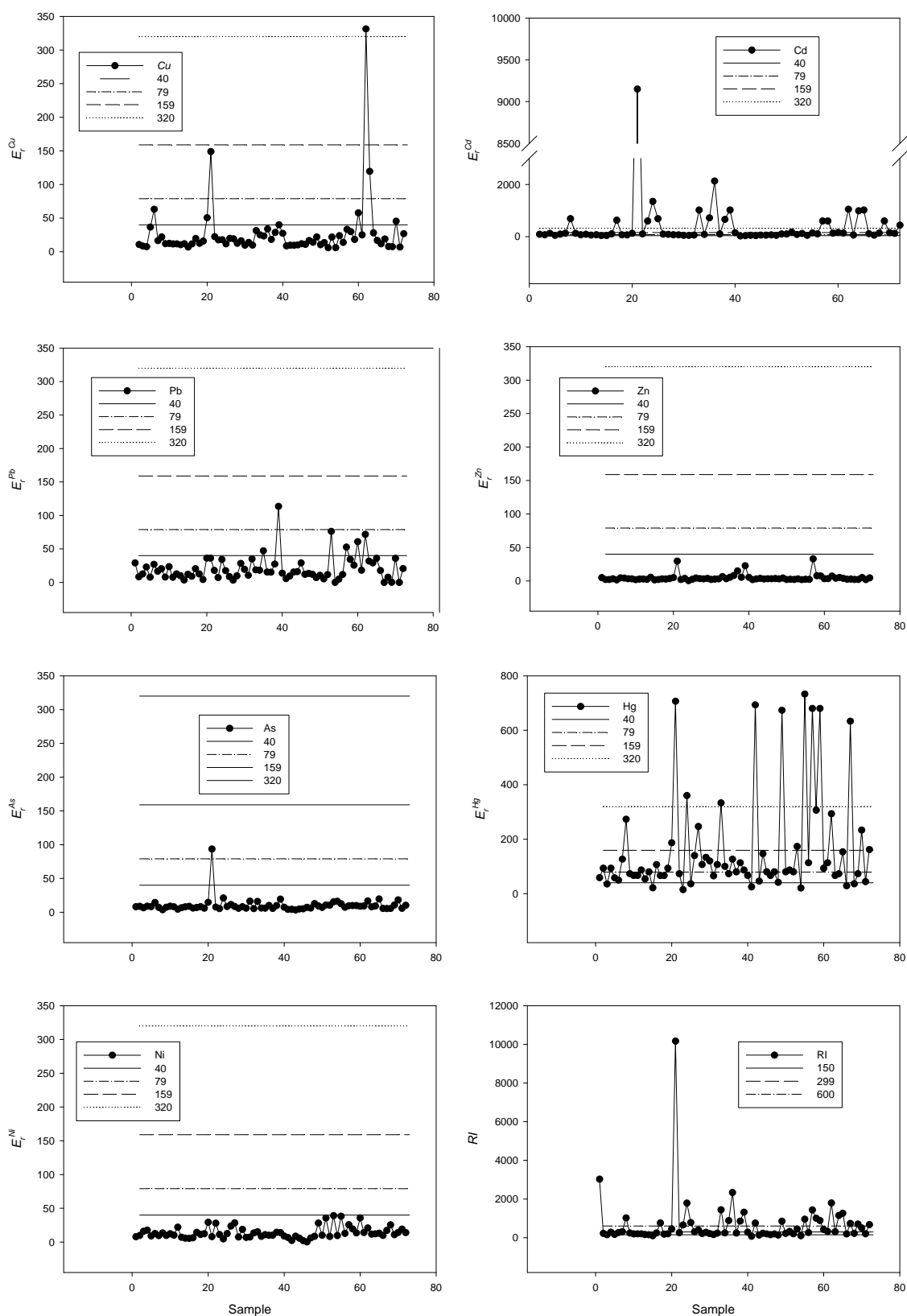


Figure 2. Potential ecological risk coefficients (E_i^t) and indexes (RI) of heavy metals in the soil of Tiexi old industrial brownfields

图 2. 老工业搬迁区土壤中重金属的潜在生态危害系数(E_i^t)和危害指数(RI)

Hg 是除 Cd 以外,潜在生态危害最为严重的金属,绝大部分采样点的 E_r^i 为 65~734, 污染水平为中等~极强,特别是 21(原沈阳冶炼厂, 现建为商住区)、42(交通区)、49(大成水泥, 工业区)、57(沈阳红梅味精厂, 工业区, 规划为广场及公园)、59(沈阳化工集团分厂, 工业区)、67(鼓风机厂, 工业区, 现规划为商住区)等采样点的 E_r^i 皆超过 600, 达到极强的潜在生态风险水平, 同时所有采样点 E_r^i 的平均值为 161.9, 为强生态危害; 金属 Cu、Pb 和 As 的潜在生态危害系数大多数保持在 40 以内, 仅有 21、62(沈阳耐火材料厂, 工业区)和 63(沈阳铸造厂, 工业区)三个采样点 Cu 的 E_r^i 超过 79, 39 号采样点 Pb 的 E_r^i 超过 79, 21 号采样点 As 的 E_r^i 为 93.56, 表明老工业搬迁区土壤属于轻微 Cu、Pb 和 As 污染水平; 金属 Zn 和 Ni 的 E_r^i 皆小于 40, 属于轻微污染水平。另外, 以多种重金属的潜在生态危害指数(RI)来评价, 其平均值为 676.5, 达到严重的生态危害, 具有很强的污染水平, 其中, 有 23 个采样点的 RI 变化范围为 660~10,174, 达到极强的污染水平, 其中又以 21 号(原沈阳冶炼厂, 现建为商住区)最为严重, 其指数高达 10,174, 具有极强的生态危害; 另外, 有 43 个采样点的 RI 变化范围在 154~505, 具有中度 - 重生态危害, 仅有 5 个采样点的指数分布低于 150(表 5)。工业活动和交通运输是引起铁西老工业搬迁区土壤重金属污染的主要因素。

综上所述, 铁西老工业搬迁区土壤重金属累积显著, 具有极强的潜在生态危害, 特别是 Cd 和 Hg 累积尤为严重, 是潜在生态危害指数的主要贡献因素, 是铁西区需要持续重点关注的污染物, 同时也是土壤修复需要重点考虑的污染物类型。因此棕地仍是未来老工业搬迁区土地管理的关键问题, 与此同时高速发展的交通运输业也已经成为影响研究区土壤等环境质量的主要因素。

4. 结论

1) 老工业搬迁区土壤中 Cu、Cd、Pb、Zn、Hg 和 Ni 的平均含量均高于其背景值, 表现出明显的累积效应, 富集顺序为 $Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > Ni$; Cu、Cd、Pb、Zn、As、Hg 和 Ni 最高值分别达 1180、30.5、625、1948.5、109、1.1 和 218.7 $mg \cdot kg^{-1}$, 分别为背景值的 66.3、305、22.7、33.0、9.4、18.3 和 10.4

倍; 部分土壤样品中 As 含量超过《场地环境评价导则》中居住用地标准限值;

2) 对不同功能区土壤重金属浓度分析知, 各功能区 7 种重金属的平均含量均高于其背景值, 其中仅以绿地重金属累积最少, 工业区、商住区和交通区重金属累积皆较严重, 其中 Cu、Zn 和 Hg 含量最大值出现在工业区, Pb 异常最大值出现在交通区, Cd、As 和 Ni 最大值出现在商住区, 工业活动和交通运输已成为影响老工业区土壤环境质量的主要因素;

3) 潜在生态风险分析表明, 铁西老工业搬迁区土壤具有极强的重金属污染生态危害, 其中 Cd 为极强潜在生态危害, Hg 为强潜在生态危害, 其余 5 种金属皆为轻微潜在生态危害, 其部分采样点亦达中度以上生态危害, 因此铁西老工业搬迁区土壤重金属累积效应显著, 特别是 Cd 污染和 Hg 污染, 是潜在生态危害指数的主要贡献因素, 也是土壤修复需要重点考虑的污染物。

参考文献 (References)

- [1] D. S. Manta, M. Angelone, A. Bellanca, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300(1-3): 229-243.
- [2] 唐秋萍, 张毅, 王伟. 化工企业拆迁场地健康风险评价[J]. *环境监测与预警*, 2010, 2(4): 7-11.
- [3] 张胜田, 林玉锁, 华小梅等. 中国污染场地管理面临的问题及对策[J]. *环境科学与管理*, 2007, 32(6): 5-7.
- [4] 谢剑, 李发生. 中国污染场地的修复与再开发的现状分析[J]. *世界环境*, 2011, 3: 56-59.
- [5] 振兴东北网. 沈阳市铁西区改造振兴十年聚焦(上)[URL], 2012. http://www.chinaneast.gov.cn/2012-06/12/c_131646439.html
- [6] 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[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(1): 123-126.
- [7] 吴新民, 李恋卿, 潘根兴等. 南京市不同功能区城区土壤中重金属 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的污染特征[J]. *环境科学*, 2003, 24(3): 105-111.
- [8] 卢瑛, 甘海华, 张波等. 深圳市城市绿地土壤中重金属的含量及化学形态分布[J]. *环境化学*, 2009, 28(2): 284-288.
- [9] 秦普丰, 刘丽, 侯红等. 工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1668-1674.
- [10] 陈秀端, 卢新卫, 赵彩凤等. 西安市二环内表层土壤重金属空间分布特征[J]. *地理学报*, 2011, 66(9): 1281-1288.
- [11] 彭景, 李泽琴, 侯家渝. 地累积指数法及生态危害指数评价法在土壤重金属污染中的应用及探讨[J]. *广东微量元素科学*, 2007, 14(8): 13-17.
- [12] 王鑫, 孙丽娜, 孙铁珩等. 细河流域土壤中重金属的污染现状及潜在生态风险[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(1): 66-70.
- [13] L. Håkanson. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 徐争启, 倪师军, 庾先国等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.

老工业搬迁区土壤重金属污染特征及潜在生态风险

- [15] 赵沁娜, 徐启新, 杨凯. 潜在生态危害指数法在典型污染行业土壤污染评价中的应用[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2005, 1: 111-116.
- [16] 兰天水, 林健, 陈建安等. 公路旁土壤中重金属污染分布及潜在生态危害的研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2003, 9(1): 4-6.