

山东东部表层土壤重金属 潜在生态风险评价模型探讨

代杰瑞, 曾宪东, 张华平, 庞绪贵

(山东省地质调查院, 山东 济南 250013)

摘要:针对当前土壤污染研究中存在的问题,提出了一种模糊识别土壤重金属污染评价的方法。并对瑞典学者(Hakanson)提出的潜在生态危害指数法进行了改进,用以计量重金属潜在生态风险。采用建立的模型对山东省东部地区土壤重金属潜在生态风险进行了评价,结果表明:该区土壤重金属元素污染程度为: $Hg > Cd > Cu > Pb > Zn > Cr > As$;而重金属潜在生态风险大小则依次为 $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$ 。总体来看,山东省东部地区存在一定程度的重金属污染,其潜在生态风险为强和很强的土壤占工区面积的 13.75%,这种综合危害特征主要受 Hg 和 Cd 元素制约,主要分布在莱州-招远-烟台和牟平-乳山金矿集中区以及人口密集的城镇地带,且已对农作物安全产生影响。认为地质背景和人类活动(采金污染、工业生产、城市人口密集生活等)的共同作用,是造成局部环境中潜在生态风险较高的重要原因。

关键词:土壤;重金属污染;潜在生态风险;山东东部

中图分类号:X53

文献标识码:B

0 引言

山东省东部地区是山东半岛蓝色经济区主体部分,也是山东经济最发达地区。城市化、工业化和农业现代化的快速推进是该地区经济发展的重要标志。然而,随着经济的快速发展,土壤、水环境污染,土壤盐渍化、海水入侵、农产品农药残留和重金属含量超标等生态问题相继出现并日趋严峻^[1]。不仅威胁人居环境、生态安全,也严重影响了当地经济的快速、持续、健康发展。因此,在山东省东部地区进行生态环境质量研究和生态风险评价具有重要的现实意义。土壤重金属污染作为土壤环境健康质量恶化重要标志之一,受到国内外学者的普遍关注,在“山东省东部地区农业生态地区化学调查”项目的支持下,该区作了大量有关土壤重金属污染方面的研究^[2-6],但这些研究大多是以土壤重金属元素的绝对含量为切入点,研究土壤重金属污染的形成机理,最终评价区域环境污染特点。直接从宏观角度利用空

间双网格采样研究较大尺度土壤重金属污染和以重金属毒性系数为出发点的研究甚少。

以山东省东部地区土壤为研究对象,综合研究土壤重金属的污染特征,采用瑞典科学家 Hakanson 的重金属潜在生态危害系数评价法^[7]对土壤重金属的生态危害效应进行分析,研究优势农作物的重金属富集特性,旨在为山东东部地区土壤污染防治、土壤资源的持续利用和管理以及保障农产品安全提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与分析

表层土壤样品采用网格布样法采集,采样密度为 1 件/ km^2 ,在采样点周围 50 m 范围内等量采集 3~5 点土壤组成一件样品。采样时除去表面杂物,垂直采集地表至 20 cm 深的土壤,保证上下均匀采集,并弃去动、植物残留体、砾石、肥料团块等,装入

* 收稿日期:2012-03-30;修订日期:2012-08-08;编辑:王秀元

基金项目:山东省国土资源大调查项目《山东省东部地区农业生态地球化学调查》(编号 2006709)资助

作者简介:代杰瑞(1977—),男,黑龙江萝北县人,高级工程师,主要从事农业地质和地球化学勘查技术应用研究工作;E-mail: daijierui@sohu.com。

干净布袋,样品原始重量大于 1 000 g;同时采集深层土壤样品,采样密度为 1 点/4km²,平原区采样深度 1.5~2.0 m,山地丘陵区采集的是 1.2 m 以下 30 cm 的土柱,以不采集半风化层物质为原则。土壤样品风干、敲碎、过 20 目尼龙筛,并按 4 个相邻网格(表层样 4 km²,深层样 16 km²)的样品组合为 1 个样进行测试。

表层土壤、深层土壤样品测试 SiO₂, Al₂O₃, CaO, K₂O, MgO, Fe₂O₃, Na₂O, Ag, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Br, Cd, Ce, Cl, Co, Cr, Cu, F, Ga, Ge, Hg, I, La, Li, Mn, Mo, N, Nb, Ni, P, Pb, Rb, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr, C, 有机碳和 pH 值,共 54 项指标。样品由武汉岩矿测试中心采用 X 射线荧光光谱、等离子光谱、氢化物原子荧光光谱、发射光谱等一整套大型精密仪器进行测试。采用了标准样、密码样、监控样等多种监控手段,保证了分析质量的可靠性,测试质量通过了中国地质调查局专家组的验收。

1.2 评价方法

不同重金属元素对农作物及人体健康的毒性不同^[8-13],即使土壤中具有相同含量的 Hg, Cd, Pb, Cr, As, Cu, Zn;它们对农作物及人体健康的危害也有差别。因此研究土壤重金属元素污染的潜在生态环境风险,要比直接评价土壤重金属元素超标倍数能更好地说明不同重金属元素的危害。瑞典科学家 Hankanson 正是从这一观点出发,从沉积学角度提出土壤或沉积物中重金属污染评价的方法,将重金属生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,比单纯采用重金属元素污染程度能更好地反映重金属元素的潜在危害。计算公式为:

$$E_r^i = C_f^i \times T_r^i$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i}$$

式中:RI 为多种重金属潜在生态危害指数;E_rⁱ 为第 i 种重金属的潜在生态危害指数;T_rⁱ 为第 i 种污染物毒性响应系数^[7](表 1,由 Hakanson 确定);C_fⁱ 为第 i 种重金属污染指数;C_i 为第 i 种重金属的实测浓度,C_nⁱ 为评价重金属元素污染的参比值。此处参比值(C_nⁱ)取值应为工业化以前未受污染的背景值,但目前几乎很难找到不受污染的土壤,研究表明该区深层土壤地球化学含量在一定程度上可以代表表

层土壤的原始沉积地球化学元素含量^[3],由于该区不同地质单元的岩性及物源差异显著,其土壤元素含量必定存在差异,若以整个研究区的深层土壤平均值作为统一标准,则不能排除由于地质高背景或低背景带来的评价结果偏低或偏高现象,故采用不同地质单元深层土壤平均值代表相应表层土壤未受污染的参比值,这样既排除了不同区域土壤元素初始含量差异的干扰,又保证了评价的合理性。

表 1 重金属元素毒性响应系数

元素	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn
毒性响应系数	40	30	10	5	5	2	1

Hakanson 提出的潜在生态危害指数法涉及 PCB, Hg, Cd, Cr, Pb, As, Cu 和 Zn 8 种污染物,其污染危害程度划分标准的设立也是基于此 8 种物质,此次调查未对 PCB 进行测试,故进行综合生态危害评价的包括 Hg, Cd, Cr, Pb, As, Cu 和 Zn 7 项指标,该文结合山东东部重金属污染特征及相关研究^[14],对 Hakanson 提出的重金属生态危害程度的划分标准做了适当调整(表 2)。

表 2 潜在生态危害评价标准

单元素潜在生态危害指数	污染程度	潜在生态危害指数(8种)	潜在生态危害指数(7种)	污染程度
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	$RI < 135$	轻微
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	$135 \leq RI < 265$	中等
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	$265 \leq RI < 525$	强
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	$RI \geq 525$	很强
$E_r^i \geq 320$	极强	$RI \geq 600$	$RI \geq 525$	极强

2 结果和讨论

2.1 单指标潜在生态危害评价结果

对研究区 13 674 件表层土壤样品重金属元素的含量范围、均值、污染指数(C_f)等特征参数进行统计(表 3)。由表可见,生态危害指数均值(C_f)由大到小顺序依次为: Hg>Cd>Cu>Pb>Zn>Cr>As>1,说明研究区表层土壤中该 7 种重金属元素均出现一定程度的累积,就土壤平均含量而言,污染最明显的重金属元素为 Hg;其次是 Cd;As, Cr 污染程度最轻。

土壤重金属单元素及综合潜在生态危害指数计算结果(表 4)表明, Hg, Cd 两元素对土壤综合潜在生态危害的贡献率之和达到了 87.95%,仅 Hg 元素的贡献率就达到了 61.96%,Hg 对土壤的潜在生

态危害最严重(图 1);潜在生态危害综合指数为 28.7~77 241.8,最大值是很强危害标准限值($RI=525$)的 147 倍,说明局部地区已出现很强生态危害,平均值为 218.3,危害程度中等。分析单个重金属元素潜在生态危害程度等级及均值(表 5)可以发现,Cr,Zn 两元素潜在生态危害系数全部小于 40,对土壤生态环境的危害轻微,Cd,Hg 在各等级危害中均有分布。土壤中 Hg 的生态危害最大,强、很强和极强危害的样品数占总数的 54.82%,其中强生态危害的样品数占总数的 40.85%,其指数均值高达 107.31,Cd 元素强生态危害等级以上的土壤样品占总数的 10.36%,As,Pb 为 0.05%,Cu 为 0.02%。可见,就单元素而言,对该区土壤潜在生态环境危害最大的元素是 Hg,而 Cr,Zn 危害轻微,危害程度排序为 $Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn$ 。

表 3 研究区土壤重金属元素含量及特征值 ($n=13\ 674$)

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn
最小值	0.80	0.01	3.70	1.10	0.003	8.90	3.40
最大值	162.30	10.54	1118.30	514.40	22.42	934.90	689.50
均值	6.62	0.12	60.81	22.78	0.05	27.66	58.37
中位值	6.2	0.105	55.5	19.2	0.028	25.1	54.7
标准偏差	3.61	0.16	32.27	15.58	0.23	19.56	23.30
污染指数 C_i^f 均值	1.03	1.89	1.06	1.31	3.38	1.23	1.16

表 4 土壤重金属元素潜在生态危害评价特征值统计

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb	Zn	RI
最小值	1.50	6.46	0.23	0.50	3.69	2.14	0.11	28.70
最大值	305.22	4478.75	36.25	134.90	72306.45	278.06	11.44	77241.8
均值	10.30	56.72	2.13	6.57	135.29	6.15	1.16	218.32
中位值	9.71	47.87	1.96	5.54	83.58	5.61	1.10	161.77
标准偏差	5.46	69.79	1.06	4.40	726.04	4.82	0.45	768.71

表 5 单个重金属元素潜在生态危害(E_i^f)等级、均值及样本百分数

元素	轻微		中等		强		很强		极强	
	占总数 /%	E_i^f 均值	占总数 /%	E_i^f 均值	占总数 /%	E_i^f 均值	占总数 /%	E_i^f 均值	占总数 /%	E_i^f 均值
As	99.75	10.14	0.19	51.99	0.04	111.96	0.01	259.19	—	—
Cd	27.32	33.33	62.32	53.58	8.79	101.75	1.20	208.10	0.37	759.29
Cr	100.00	2.13	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu	99.82	6.48	0.15	53.47	0.02	114.14	—	—	—	—
Hg	4.13	29.99	41.00	62.54	40.85	107.31	9.80	210.55	4.22	1041.27
Pb	99.88	6.03	0.06	58.14	0.04	119.31	0.01	275.49	—	—
Zn	100.00	1.16	—	—	—	—	—	—	—	—

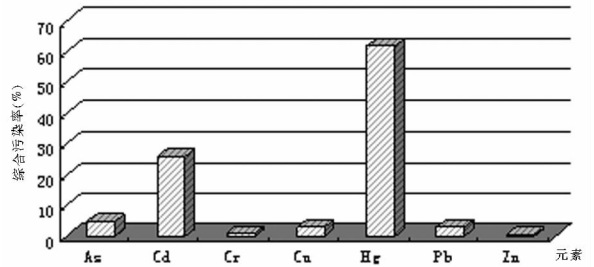


图 1 重金属元素对综合潜在生态危害贡献率柱状图

2.2 综合潜在生态危害评价结果

由图 2 看出,该区土壤重金属元素综合潜在生态危害指数(RI)的空间分布规律明显,烟台采金区、牟乳断裂金成矿带以及青岛北石墨矿区是土壤重金属元素潜在生态危害很强分布区,除 Cr,Zn 外,其余重金属元素均具有较强的生态危害,是在金矿体伴生重金属元素高背景上,叠加矿山开采、选冶活动导致多种重金属地表富集,面积 1 378.40 km^2 ,占 2.60%;上述很强生态危害分布区的外围以及临朐、潍坊、胶州、高密、日照、青岛、蓬莱市区及多数乡镇周边地带是强的生态危害分布区,从分布态势来看,主要与人类日常生活活动、“工业三废”排放的含 Hg,Cd 等污染物有关,面积 5912.28 km^2 ,占 11.15%;研究区中部、南部大部分地区以及威海东部是土壤重金属元素中等生态危害区,面积 39 498.86 km^2 ,占 74.50%;潍坊市北部沿海、研究区南部和东部、

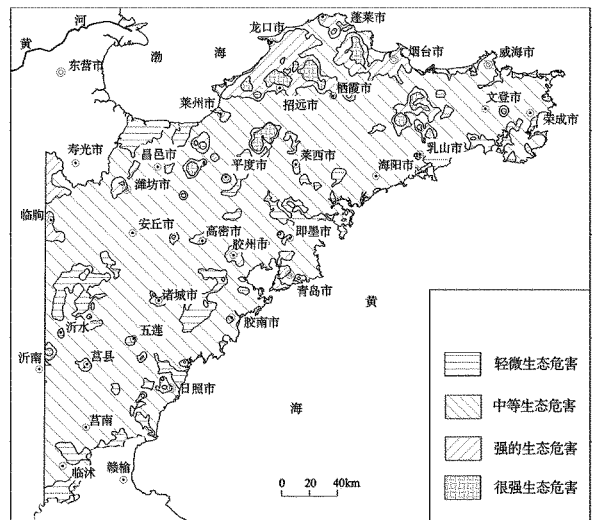


图 2 区域土壤重金属元素综合潜在生态危害程度分区图

表 6 不同生态危害区内小麦平均含量、超标率统计

元素	限量值 (10^{-6})	中等危害区(样本数 41 个)			强危害区(样本数 23 个)			很强危害区(样本数 20 个)		
		平均含量 (10^{-6})	超标数	超标率 %	平均含量 (10^{-6})	超标数	超标率 %	平均含量 (10^{-6})	超标数	超标率 %
Cr	1	0.48	6	14.63	0.44	3	13.0	0.30	1	5
Cd	0.1	0.041	1	2.44	0.048	1	4.35	0.165	8	40
Pb	0.2	0.12	1	2.44	0.10	0	0	0.12	2	10
Zn	50	32.10	1	2.44	35.67	0	0	38.24	1	5
As	0.1	0.022	0	0	0.027	0	0	0.029	0	0
Hg	0.02	0.003	0	0	0.005	0	0	0.006	0	0
Cu	10	4.65	0	0	5.37	0	0	5.96	0	0

①样品取自烟台重金属元素严重污染带的小麦种植区;样品分析由湖北省地质试验研究所完成;国家标准限值据中华人民共和国国家标准 GB2762-94,GB2715-2005,GB13106-1991,GB14961-1994,GB15199-1994,GB15201-1994。

沂水-安丘以及青岛市局部地段是土壤重金属元素轻微生态危害区,面积 6 230.03 km²,占 11.75%。

2.3 潜在生态危害区生态效应评价

在烟台市范围内共采集 84 件小麦籽实样品,其中有 41 件位于中等生态危害区内,23 件位于强的生态危害区内,20 件位于很强生态危害区内。小麦籽实样品在不同生态危害区平均含量见表 6,由表 6 可见,受土壤重金属元素污染的强生态危害区内,小麦籽实中 Cd,Zn,As,Hg,Cu 的含量均值是中等生态危害区的 1.11~1.67 倍;很强生态危害区内小麦籽实中 Cd 含量均值是中等生态危害区的 3.44 倍,Pb,Zn,As,Cu 平均含量也较高。

依据国家食品卫生限量标准,土壤重金属元素很高生态危害区内 20 件小麦籽实样品中 Cd,Pb,Zn 的超标率分别为 40%,10%和 5%,而较高生态危害区 41 件小麦样品中,Cd 超标率仅为 4.35%,Pb,Zn 均未超标,即小麦受重金属污染较小。由以上分析可见:①该区局部土壤重金属污染物已迁移到小麦体内,对人体健康产生影响;②土壤污染严重地区的小麦籽实重金属含量较其他地区高;③很强生态危害区内小麦籽实 Cd,Pb 等重金属超标率较其他生态危害区大,是对此次土壤潜在生态危害评价结果的验证。

3 结论

(1)山东省东部地区土壤受到 Hg,Cd,Pb,Cu,Zn 等重金属污染,且这些元素对土壤的污染程度不同,其中 Hg($C_f=3.38$)元素对土壤的污染最严重,其次是 Cd($C_f=1.89$),而 As,Cr 污染程度最轻。

(2)采用不同地质单元深层土壤平均值来代替工业化以前未受污染的土壤背景值,并将其作为

Hakanson 提出的 C_i^n 值(评价重金属污染的参比值),实践证明是可行的。具潜在生态危害的重金属主要是 Cd,Hg,已达到强-很强危害水平,其余重金属(As,Cr,Cu,Pb,Zn)大部分区域均显示为轻微-中等危害水平,其中 Cr,Zn 全区均为轻微危害。

(3)该区潜在生态危害综合指数为 28.7~77 241.8,说明局部地区已出现很强生态危害,平均值为 218.3,属中等危害程度。潜在生态风险强和很强的土壤占工区面积的 13.75%,该种综合危害特征主要受 Hg 和 Cd 元素制约,分布在莱州-招远-烟台和牟平-乳山金矿集中区以及人口密集的城镇地带,这种分布规律与目前金矿开采、金矿选冶和工业生产、城市人类活动布局呈现显著的相关关系。局部土壤重金属污染物(Cd,Cr,Pb,Zn 等)已迁移到小麦体内,具有较强生态风险性,有必要进一步对强-很强危害区内农作物进行抽样调查,或健全农产品污染物检测体系,以确保人民群众的身体健

参考文献:

- [1] 代杰瑞,庞绪贵,喻超,等.山东省东部地区农业生态地球化学调查及其生态问题浅析[J].岩矿测试,2012,31(1):188-196.
- [2] 代杰瑞,庞绪贵,喻超,等.山东省东部地区土壤地球化学特征及污染评价[J].中国地质,2011,38(5):1387-1395.
- [3] 代杰瑞,庞绪贵,喻超,等.山东省东部地区土壤地球化学基准值与背景值及元素富集特征研究[J].地球化学,2011,40(6):577-587.
- [4] 代杰瑞,庞绪贵,宫玉新,等.山东威海农业生态地球化学调查与评价[J].地质通报,2010,29(9):1391-1398.
- [5] 代杰瑞,赵西强,喻超,等.青岛市生态地球化学预测与预警研究[J].地球学报,2011,32(4):447-455.
- [6] 代杰瑞,崔元俊,庞绪贵,等.山东省东部地区农业生态地球化学调查与评价[J].山东国土资源,2011,31(5):1-8.
- [7] LarsHakanson. An ecological risk index for aquaic pollution

- con-trol - A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(2): 975 - 978.
- [8] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 108 - 112.
- [9] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 等. 重庆市主城区土壤重金属的潜在生态危害评价[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2006, 20(1): 114 - 116.
- [10] 刘文新, 栾兆坤, 汤鸿霄. 乐安江沉积物中金属污染的潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 1999, 9(2): 206 - 211.
- [11] 赵沁娜, 启新凯. 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研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2005, 21(1): 111 - 116.
- [12] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2003, 23(5): 521 - 525.
- [13] 宣昊, 滕彦国, 倪师军, 等. 基于地球化学基线的土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 69 - 72.
- [14] 徐清, 张立新, 刘素红, 等. 表土壤重金属污染及潜在生态风险评价—包头市不同功能区案例研究[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(6): 6 - 12.

Study on Potential Ecological Risk Assessment Model of Heavy Metals in the Surface Soil of Eastern Shandong Province

DAI Jierui, ZENG Xiandong, ZHANG Huaping, PANG Xugui

(Shandong Geological Surveying Institute, Shandong Jinan 250013, China)

Abstract: Pointing to problems occurred in soil pollution in the soil, a method that is able to vaguely evaluate weight metal pollution in soil has been put forward. The potential environmental damage parameter which was proposed by Hakanson, one researcher from Sweden has been improved, so as to calculate the potential risk of weight metals. By using this presented method, the potential environment risk of weight metals in soil of eastern Shandong province has been evaluated. It is showed that the degree of weight metal pollution in soil in study area is $Hg > Cd > Cu > Pb > Zn > Cr > As$, while the potential environment risk of weight metals is identified as the order of $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$. In all over, a certain degree of weight metal pollution occurred in eastern Shandong province. The soil with high potential environment risk caused by weight metal pollution can take 13.75% in the whole square. This kind of comprehensive characteristics of damages are constrained by Hg and Cd, and mianly distributed in Laizhou - Zhaoyuan - Yantai and Mouping - Rushan gold concentration areas and towns with a large population. The crop production in safety has already been affected. It is considered that geological background and human activities (including pollution from gold exploration, industry, the city with a dense population) are the main factors resulting in the high potential environment risk in the located area.

Key words: Soil; weight metal pollution; the potential environment risk; eastern Shandong province