

## 土壤生态地球化学风险评价——以乐陵-河口地区为例

赵西强, 王存龙, 喻超 (山东省地质调查院, 山东济南 250013)

**摘要** 以全国土壤污染防治项目取得的地球化学数据为基础, 对乐陵-河口地区土壤重金属含量水平、污染现状、主要来源进行系统研究, 并在研究区内开展土壤生态地球化学风险评价, 结果表明: 表层土壤中元素 Cd、Hg、Pb 富集系数较大, 其平均含量分别为 0.16 mg/kg、0.030 mg/kg、21.8 mg/kg, 表现出明显的表层富集特征。区内土壤重金属元素潜在生态危害轻微级达到 90.07%, 中等的占 9.58%, 强的占 0.35%, 没有很强和极强级别, 土壤潜在生态危害不很严重。Hg、Cd、As 3 种元素对土壤危害的贡献率之和达到 86.55%, Hg 是调查区土壤污染最严重和危害最大的重金属元素, 其生态危害贡献率就达到了 48.03%; Cd 次之, 强和很强生态危害等级以上的土壤样品占总数的 0.32%; 土壤重金属元素危害程度从大到小的排序为 Hg > Cd > Pb > As > Cu > Ni > Cr > Zn。该研究在制定重金属污染防治对策、进行土壤环境质量保护等方面具有重要的指导作用。

**关键词** 土壤重金属污染; 生态地球化学; 风险评价; 乐陵-河口

中图分类号 S181.3 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2014)28-09906-04

## The Soil Ecological Geochemistry Risk Assessment—A Case Study in Leling- Estuary Area

ZHAO Xi-qiang, WANG Cun-long, YU Chao (Shandong Institute of Geological Survey, Ji'nan, Shandong 250013)

**Abstract** Based on the geochemical data obtained from the national project about the prevention and control of soil contamination, through studying on the pollution investigation and the temporal and spatial variation of soil heavy metal, this study analyzed the pollution status and dynamic changes of soil heavy metals profoundly and systematically, carried out ecological geochemical assessment of risk in the study area. The results showed that: potential ecological risk of heavy metals in the soil was in slight level. The contribution of the elements Hg, Cd, As in soil damage reached 86.55%. The contribution of the ecological hazards of the element Hg reached 48.03%. The samples that the degree of ecological hazard of Hg are very serious and extremely serious accounted for 9.58% of the total, The contribution of Hg in ecological hazard only reach 44.64% among the three elements; The samples of Cd above the level of serious ecological hazards accounted for 0.32%. The elements sorted in descending in ecological hazard is Hg > Cd > Pb > As > Cu > Ni > Cr > Zn. This study will provide technical support for heavy metal pollution prevention and soil environmental quality protection.

**Key words** Soil heavy metal pollution; Eco-geochemical; Risk assessment; Leling-Estuary

调查区位于山东省北部边缘, 涉及德州、滨州、东营 3 市所辖 10 个县(市、区)部分地区, 面积 1.00 万 km<sup>2</sup>。地理坐标为 116°15' ~ 119°15' E, 37°28' ~ 38°22' N。区内属于暖温带大陆型季风气候区, 四季分明, 春季干旱少雨多风; 夏季炎热多雨湿度大; 秋季旱涝不均; 冬季严寒干燥, 雨雪稀少。区内水系十分发育, 马颊河、徒骇河、德惠新河独流入海, 多为季节性河流。卫运河及漳卫运河在工作区西北、北部穿过, 为山东省与河北省的界河。马颊河从陵县进入工作区, 横贯测区的宁津、乐陵、庆云到无棣县北部入渤海, 是区内的主要河流。徒骇河从沾化县进入工作区, 南北向穿越工作区, 北入渤海。区内除无棣县碣石山有小面积的新生代玄武岩出露外, 其余全为第四纪松散沉积物覆盖。地形较为平坦。地面标高一般小于 70 m, 总的地势为西高东低, 自南西向北东微倾。按地貌成因类型可划分为黄河冲积平原、冲海积平原、现代黄河三角洲平原 3 种地貌单元<sup>[1-3]</sup>。近年来, 由于化肥、农药的大量使用和城镇污水排放, 区内土壤环境质量污染严重。

## 1 样品采集与分析

**1.1 样品采集** 根据“多目标区域地球化学调查规范”技术要求<sup>[4]</sup>, 中国地质调查局现已开展的多目标地球化学调查项目分别采用 1 个样/km<sup>2</sup>、1 个样/4 km<sup>2</sup> 组合分析样采集表层

土壤样品, 采样深度 0 ~ 20 cm, 以 1 个样/4 km<sup>2</sup>、1 个样/16 km<sup>2</sup> 组合分析样采集深层土壤样品, 采样深度 150 ~ 200 cm。为使采集的土壤样品具有代表性并兼顾均匀性与合理性, 应在采样小格中心 100 m 范围内 3 ~ 5 处多点采集组合, 样品重量大于 1 000 g。样品分析 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等 54 项元素和指标<sup>[5]</sup>。

**1.2 样品测试分析** 样品分析测试由湖北省地质实验研究所完成。元素 As、Hg 采用原子荧光光谱法(AFS)分析, 元素 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 用等离子质谱法(ICP-MS)分析, Cr 元素采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测试。样品测试分析方法检出限均低于规范要求, 其中 As、Hg 的检出限分别为 0.2 mg/kg、0.4 μg/kg, Cd 的检出限为 0.02 mg/kg, Cu、Cr、Ni、Pb、Zn 的检出限分别为 0.1 mg/kg、2 mg/kg、0.2 mg/kg、0.2 mg/kg、0.5 mg/kg。

分析过程插入国家一级标准物质及 5% 密码重复样对元素的分析质量进行监控, 对国家一级标准物质及密码重复样的计算结果表明元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 分析准确度和精密度分别控制在 0.01 ~ 0.03、2% ~ 4%, 远低于规范质量标准。密码重复样合格率均大于 85%, 显示样品分析的重复性较好, 达到分析测试规范要求。并经中国地质调查局专家验收通过, 评分 91 分, 评定等级为优秀级。该研究所引用的分析数据, 质量优秀、真实可靠。

**1.3 数据处理** 该研究参照中国地质调查局《土壤地球化学基准值与背景值研究若干要求》统计全区及各统计单元的基准值和背景值, 是针对统计样品数不少于 30 个而言。当单元统计样品数较少(不足 30 个)时, 则用中位数值( $X_{me}$ )代

**基金项目** 全国土壤现状调查及污染防治项目资助(GZTR20060104)。  
**作者简介** 赵西强(1980-), 男, 山东曹县人, 工程师, 从事生态地球化学调查与评价工作。

**收稿日期** 2014-08-22

表基准值,算术平均值加减 2 倍算术标准偏差( $X_{me} \pm 2S$ )代表基准值变化范围。背景值的求取方法与基准值相同。对于区域性数据的成图采用 MapGIS 软件参照多目标区域地球化学调查规范执行并绘制。

## 2 结果与分析

**2.1 重金属元素含量特征** 乐陵-河口地区土壤重金属元素含量参数统计见表 1。由表 1 可见,深层土壤中重金属元素含量范围变化不大,其平均含量相比山东土壤背景和全国

土壤背景较为接近。相对于深层土壤,表层土壤中元素 As、Cr、Cu、Ni、Zn 的平均含量较为接近,而 Cd、Hg、Pb 富集系数较大,其平均含量分别为 0.16 mg/kg、0.030 mg/kg、21.8 mg/kg,表现出明显的表层富集特征。与山东土壤背景和全国土壤背景相比,表层土壤中 As、Cd、Cr、Ni 的含量水平较高,Cu、Pb 的含量水平较低,其中 Cd 平均含量分别为山东土壤背景的 1.9 倍,说明研究区内表层土壤中 As、Cd、Cr、Ni 的污染程度略高,Cu、Pb 的污染水平较低。

表 1 乐陵-河口地区土壤重金属元素含量统计

元素	深层土壤( $n=529$ )			表层土壤( $n=2014$ )			土壤背景值 <sup>[6]</sup> mg/kg	富集 系数
	含量范围//mg/kg	平均值//mg/kg	标准差	含量范围//mg/kg	平均值//mg/kg	标准差		
As	6.5~20.1	11.2	2.1	5.5~22.6	11.2	2.4	9.3	1.00
Cd	0.060~0.211	0.110	0.02	0.058~1.090	0.160	0.047	0.084	1.41
Cr	48.8~91.0	66.8	5.8	44.4~94.8	67.9	6.7	66	1.02
Cu	11.7~37.7	21.5	3.4	8.6~83.9	22.8	11.3	24.0	1.06
Hg	0.007~0.086	0.020	0.004	0.006~0.204	0.030	0.009	0.019	1.52
Ni	16.7~44.6	28.7	3.8	15.1~48.2	28.9	4.8	25.8	1.01
Pb	11.2~30.9	18.9	2	13.7~350.9	21.8	3	25.8	1.15
Zn	38.0~98.9	62.8	8.2	34.1~231.0	67.9	10.1	63.5	1.08

**2.2 土壤重金属污染评价** 土壤重金属元素污染等级划分是土壤重金属环境污染评价的基础,是全国土地质量调查与污染防治成果工作的重要组成部分。污染等级划分是以土壤元素基准值为基础,以基准值上限的  $n$  倍( $n=1,2,3$ )对土壤重金属含量进行污染等级分等,以确定土壤重金属污染的程度,为土地质量等级评估、生态地球化学预警及土壤污染治理提供基础地球化学依据<sup>[7-9]</sup>。

**2.2.1 重金属污染单因子评价。**土壤重金属元素单因子评价采用污染分指数法,逐一计算土壤中重金属的污染分指数,以确定其污染程度。土壤中重金属污染分指数计算式为:

$$P_i = C_i / C_{0i}$$

式中, $P_i$  为土壤中  $i$  重金属的污染分指数; $C_i$  是土壤中  $i$  重金属元素含量; $C_{0i}$  为  $i$  污染物的评价标准。研究区土壤重金属污染单因子评价结果见表 2。

表 2 乐陵-河口地区土壤重金属元素污染评价统计结果

指标	清洁区		轻污染区		中污染区		重污染区	
	面积//km <sup>2</sup>	比例//%						
Hg	5 966.2	59.81	3 708.0	37.17	268.9	2.70	31.4	0.31
Cd	5 537.2	55.51	4 412.6	44.24	24.4	0.24	0.2	0.01
Pb	7 882.8	79.03	2 074.5	20.80	5.5	0.06	11.6	0.12
Cu	9 204.6	92.28	765.6	7.68	4.3	0.04		
As	9 527.6	95.52	446.9	4.48				
Cr	9 312.5	93.36	662.0	6.64				
Ni	9 436.7	94.61	537.8	5.39				
Zn	8 874.0	88.97	1 100.5	11.03				

由表 2 可见,Cd、Hg 是调查区土壤污染最严重的重金属元素,Pb、Cu 次之,其中 Cd、Hg 轻污染区面积分别达 4 412.6 km<sup>2</sup>、3 708.0 km<sup>2</sup>,中度污染区面积分别达 24.4 km<sup>2</sup>、268.9 km<sup>2</sup>;Hg、Pb 严重污染区面积分别达 31.4 km<sup>2</sup>、11.6 km<sup>2</sup>;重金属元素的中度及重度污染区主要分布在德州城区、无棣县城、乐陵市和河口区的城区及近郊等工矿区。

**2.2.2 重金属污染综合评价。**土壤重金属污染综合评价利用内梅罗指数法,并根据内梅罗指数的大小确定重金属综合污染程度,综合污染指数越大污染越严重。内梅罗指数计算公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{\max(I_i)^2 + (\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2)}{2}}$$

式中, $P$  为土壤重金属综合污染指数; $I_i$  为土壤中  $i$  污染物的污染指数; $n$  为土壤中参与评价的污染物种类数。其中综合指数  $P \geq 4$  时表示土壤重度污染; $2 \leq P < 4$  时为中度污染; $1 \leq P < 2$  时轻度污染; $P < 1$  时表示土壤清洁。

研究区内土壤重金属综合污染评价结果见表 3,由表 3 可见,区内土壤重金属综合污染程度以清洁区和轻度污染为主,其面积占研究区总面积的 99.17%,其中轻污染区面积达 4 476.3 km<sup>2</sup>,分布广泛;中度污染区主要分布在德州市、乐陵市、无棣县、河口区等城区及周边地区,面积为 53.8 km<sup>2</sup>;严重污染区在河口区有零星分布,面积为 3.0 km<sup>2</sup>。

**2.3 污染来源分析** 据山东省环保局 2006 年资料统计,调查区年排放废水总量 15 852 万 t,废水排放达标量为 13 950 万 t,

表3 研究区土壤重金属综合污染评价结果

污染等级	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
清洁区	5 441.4	54.55
轻污染区	4 476.3	44.88
中度污染区	53.8	0.54
严重污染区	3.0	0.03

万t,达标率88%(与20世纪的1995年相比达标率上升了近45个百分点),其中德州市、滨州市和东营市河口区废水排放量分别达11 545万t、1 095万t和3 212万t。近年来全区污水排放达标率逐年提高,从1990年到2000年提高了近60个百分点。污水中的污染物主要有化学耗氧量、悬浮物、挥发酚、硫化物、氰化物、石油类、砷、六价铬、铅、镉、汞等,其中化学耗氧量、悬浮物和硫化物所占比例最大,属主要污染物。从行业看,造纸及纸制品业、食品、饮料和烟草制造业、化工、纺织、医药、矿产、皮革、毛皮及其制品等是污染较重行业。

河流水质污染,直接来源于工业、农业和人为因素的影响,随着经济发展和企业追求经济效益,使河流水质污染日趋严重,调查区河流遭到100%的污染。而浅层地下水除受工业污染外,农业污染也较突出。农业污染物主要有“三氮”、有机磷、有机氯等。浅层地下水污染较严重的地段主要分布于排污河道沿岸、城镇和工业集中区,包括东营、德州、滨州等,从监测资料可知,污染因子主要为汞、酚、化学耗氧量等。

**2.4 土壤重金属潜在生态危害评价** 土壤是生态环境的重要组成部分,是农作物的直接营养来源。土壤对重金属有较强的累积富集作用能力,重金属在土壤中积累到一定程度会对土壤-植物系统产生危害,并可能通过食物链等途径危害人类健康。以这次调查取得的土壤分析数据为基础,参照国家土壤环境质量标准及重金属潜在危害评价体系,评价土壤环境质量现状、污染物的空间分布以及重金属的毒理性特征,为研究区农业生产、发展规划以及农业生态环境保护、污染治理提供依据。

**2.4.1 重金属潜在危害评价体系的建立。**瑞典科学家 Hakanson<sup>[10]</sup>提出的潜在生态危害指数法是根据重金属性质及环境行为特点,对土壤中土壤重金属污染进行评价的方法。该法不仅考虑土壤重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采取具有可比性、等价属性指数分级法进行评价<sup>[11]</sup>,其表达式为:

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

式中:RI为潜在生态危害指数; $E_r^i$ 为单一元素潜在生态危害系数; $T_r^i$ 为单一金属的毒性相关系数,各金属的毒性相关系数为:Hg=40、Cd=30、As=10、Cu=Pb=Ni=5、Cr=2、Zn=1; $C_f^i$ 为单一金属的污染系数; $C_s^i$ 为重金属的实测值; $C_n^i$ 为重金属浓度的参比值(背景值),该研究采用研究区土壤背景值作为参比(单位 $10^{-6}$ ):Hg=0.021、Cd=0.152、As=10.8、Cu=22.2、Pb=21.1、Ni=28.4、Cr=67.7、Zn=66.50。该方法

不仅反映了某一特定环境中各种污染物对环境的影响,及多种污染物的综合效应,而且用定量的方法划分出了潜在生态危害的程度,是这次评价研究区土壤质量的重要方法。潜在生态危害指数采用表4划分质量级别。

表4 潜在生态污染程度划分

潜在生态危害系数	污染程度	潜在生态危害指数	污染等级
$E_r^i < 40$	轻微的生态危害	$RI < 150$	轻微的生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中等的生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等的生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	强的生态危害	$300 \leq RI < 600$	强的生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	很强的生态危害	$RI \geq 600$	很强的生态危害
$E_r^i \geq 320$	极强的生态危害		

**2.4.2 土壤环境质量评价结果。**依照土壤重金属元素含量参比值,对研究区2014件土壤样品进行单个重金属元素及多种重金属元素的潜在生态危害指数计算,其潜在生态危害指数和综合污染指数的统计特征值如表5所示。

表5 土壤重金属元素潜在危害评价结果(n=2014)

项目	最大	最小	平均
Cd	215.13	11.45	31.09
Hg	388.57	11.43	48.48
Pb	83.15	3.25	5.15
As	20.93	5.09	10.39
Cr	2.80	1.31	2.01
Ni	8.49	2.66	5.10
Cu	18.90	1.94	5.12
Zn	3.47	0.51	1.02
RI	597.87	49.68	107.65

土壤中重金属元素综合潜在生态危害指数(RI)图显示,潜在生态危害极强和很强的样品为零;强的土壤样品占总样品数的0.35%(图1)。Hg、Cd、As3种元素对土壤危害的贡献率之和达到86.55%,其中仅Hg元素的贡献率就达到了48.03%(图2),可见Hg对该地区的潜在生态环境危害最严重。

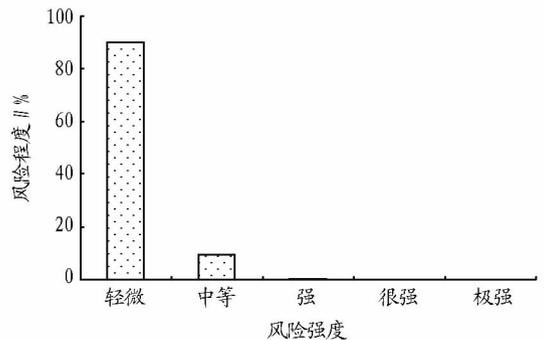


图1 土壤重金属元素综合潜在生态危害(RI)程度百分比

分析单个重金属元素潜在生态危害程度等级及其均值(表5)发现,As、Cr、Cu、Ni、Zn5种元素潜在生态危害系数全部小于40,对土壤生态危害轻微;Hg、Cd、Pb在不同等级危害中分布如表6所示。其中,Hg的生态危害最大,强、很强和极强危害的样品占总数的9.69%,强生态危害的土壤样品数

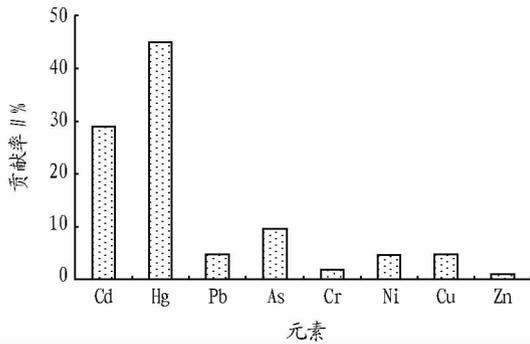


图2 不同重金属元素对综合潜在生态危害(RI)的贡献率占总数的44.64%;Cd元素强和很强生态危害等级以上的土壤样品占总数的0.32%。可见就单元素而言,对农田土壤潜在生态危害最大的元素是Hg,尤其是德州城区及河口采油厂等地均为极强危害区;其次是Cd、Pb,危害较轻;As、Cu、Cr、Ni、Zn目前尚无危害,危害程度从大到小的排序为Hg>Cd>Pb>As>Cu>Ni>Cr>Zn。

表6 单个重金属元素的潜在生态危害等级及样本百分数

元素	轻微风险	中等风险	强风险	很强风险	极强风险
Hg	45.68	44.64	8.89	0.75	0.05
Cd	85	14.68	0.23	0.09	-
Pb	99.95	0.05	-	-	-
Cr	100	-	-	-	-
Cu	100	-	-	-	-
Ni	100	-	-	-	-
As	100	-	-	-	-
Zn	100	-	-	-	-
RI	90.07	9.58	0.35	-	-

### 3 结论

研究区土壤污染的主要因子是重金属元素Hg、Cd、Pb、

As、Cu、Zn,矿业开采与冶炼所产生的工业三废排放物是土壤重金属污染的主要来源。

区内土壤重金属元素潜在生态危害轻微级达到90.07%,中等的占9.58%,强的占0.35%,没有很强和极强级别,土壤潜在生态危害不很严重。Hg、Cd、As 3种元素对土壤危害的贡献率之和达到86.55%,其中仅Hg元素的贡献率就达到了48.03%。

分析单个重金属元素潜在生态危害程度等级,As、Cr、Cu、Ni、Zn 5种元素潜在生态危害系数全部小于40,对土壤生态危害轻微;Hg、Cd、Pb土壤生态危害较重。其中,Hg的生态危害最大,强、很强和极强危害的样品占总数的9.69%,强生态危害的土壤样品数占总数的44.64%;Cd元素强和很强生态危害等级以上的土壤样品占总数的0.32%。危害程度从大到小的排序为Hg>Cd>Pb>As>Cu>Ni>Cr>Zn。

### 参考文献

- [1] 王存龙,赵西强,蒋文惠,等.山东省乐陵—河口地区重金属污染现状与分布迁移规律[J].物探与化探,2012,36(3):435-440.
- [2] 王存龙,赵西强,谢跃春,等.山东乐陵金丝小枣种植区土壤地球化学特征[J].地球与环境,2013,41(1):56-64.
- [3] 王存龙,蒋文惠,赵西强,等.山东省乐陵—河口地区土壤质量评价与地力提升研究[J].山东国土资源,2013,29(12):54-60.
- [4] 中国地质调查局.1:250000多目标区域地球化学调查规范(DD205-01)[S].2005.
- [5] 奚小环.生态地球化学:从调查实践到应用理论的系统工程[J].地学前缘,2008,15(5):1-8.
- [6] 万广华.山东土壤[M].北京:中国农业科学出版社,1994.
- [7] 奚小环.土壤污染地球化学标准及等级划分问题讨论[J].物探与化探,2006,30(6):471-474.
- [8] 陈国光,梁晓红,周国华,等.土壤元素污染等级划分方法及其应用[J].中国地质,2011,38(6):1631-1639.
- [9] 王存龙,夏学齐,赵西强,等.山东省小清河沿岸土壤重金属污染分布及迁移规律[J].中国地质,2012,39(2):530-538.
- [10] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach [J]. Water Res, 1980,14(8):975-1001.
- [11] 王存龙,王增辉,郑伟军,等.章丘市富硒土壤环境对大葱品质的影响[J].安徽农业科学,2011,39(27):16577-16580.

(上接第9777页)

野外调查与观察时发现冬青卫矛巢蛾的天敌昆虫较多,有姬蜂、寄蝇等多种寄生性昆虫,一般情况下不易大暴发,且大暴发后连续多年虫口都会保持在很低水平。非大发生年份可通过人工除网和保护天敌昆虫等方式控制虫口密度。大暴发年份可通过使用抑太保、灭幼脲、阿维菌素等农药压低虫口密度。

### 参考文献

- [1] 林焕章,朱铁人.大叶黄杨巢蛾生活习性初步观察[J].昆虫知识,1987,24(4):223-225.
- [2] 黄信飞,王成炬.大叶黄杨巢蛾的初步观察[J].植物保护,1988,14(4):18-19.
- [3] 胡兴平,李士竹.灰色巢蛾生物学观察[J].森林病虫通讯,1991(2):18-19.
- [4] 王中武,孟庆珍,范文忠.卫矛巢蛾发生与危害[J].植物保护,2004,30(1):91.
- [5] 于海丽.中国巢蛾科系统分类初步研究[D].天津:南开大学,2001:40-64.