

# 青海民和—海石湾一带土壤重金属异常成因研究

章巧秋<sup>1</sup>, 谢正苗<sup>1</sup>, 姬丙艳<sup>2</sup>, 张亚峰<sup>2</sup>, 唐俊红<sup>1</sup>

(1. 杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018; 2. 青海省第五地质矿产勘查院, 青海 西宁 810012)

**摘要:**青海省多目标区域地球化学调查发现,民和—海石湾一带的狭长谷地沿109国道两侧分布的土壤中存在以Cd、Pb、Hg、Cr等重金属元素为主组成的综合异常。空间上各异常元素套合较好,而且综合异常面积较大,异常元素衬度较高。经相关分析,Cr元素与土壤常量组分显著相关,与SiO<sub>2</sub>含量呈负相关关系,同时,Cr元素水平剖面上城区含量明显高于其他地方,垂向剖面上呈现元素表层略微富集的现象;Cd与有机碳之间存在显著性相关关系,与TF<sub>2</sub>O<sub>3</sub>不存在显著性相关关系;Pb元素在80 cm以上的土壤中,异常区土壤中的含量明显高于非异常区,Pb异常基本存在于表层土壤中;Hg元素含量表层富集明显,城区土壤中的Hg含量远高于其他地方。研究结果表明,人为源输入是导致该地区Cd、Pb、Hg异常的主要因素,而Cr元素异常的形成具有双成因性质,在较高自然背景上产生了人为源叠加。因此,加强异常区工业“三废”的控制和管理,是防止异常面积扩大的有效措施。

**关键词:**多目标区域地球化学调查;土壤;元素异常;土壤质地

中图分类号:P579;X53

文献标识码:A

文章编号:1000-6524(2011)06-1125-07

## A study of the origin of heavy metal anomaly in soil of Minhe-Haishiwan area, Qinghai Province

ZHANG Qiao-qiu<sup>1</sup>, XIE Zheng-miao<sup>1</sup>, JI Bing-yan<sup>2</sup>, ZHANG Ya-feng<sup>2</sup> and TANG Jun-hong<sup>1</sup>

(1. Hangzhou University of Electronics Technology, Hangzhou 310018, China; 2. No. 5 Institute of Geological and Mineral Exploration, Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, Xining 810012, China)

**Abstract:** This paper reports some results of multi-purpose geochemical mapping in Qinghai Province. Soil heavy metal anomalies of such elements as Cd, Pb, Hg and Cr were detected in the narrow valley of Minhe and Haishiwan, along Road 109. The heavy metal anomalies exhibit features of relatively large anomalous area and high thresholds of anomalous elements. The results of correlation analysis show that Cr is significantly associated with soil constant components and negatively related to SiO<sub>2</sub>. Cr is slightly concentrated in the top layer of soil in vertical section while urban areas have considerably higher level of Cr along the horizontal section. Cd is evidently associated with organic carbon, but there exists no such obvious correlation between Cd and TF<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Beyond the soil depth of 80 cm, the content of Pb in the anomalous area is obviously higher than that in other areas. Pb anomaly basically exists at the surface of the soil. Hg is obviously concentrated at the surface of soil, while in the urban area it exists at the higher level. The results indicate that anthropogenic input is the main factor responsible for the formation of anomalies of Cd, Pb and Hg. The anthropogenic input increases the content of Cr in the high natural background. Therefore, we must control and manage the industrial “three wastes” in the anomalous area to prevent the expansion of the soil heavy metal anomaly.

**Key words:** multi-purpose regional geochemical survey; soil; element anomaly; soil texture

收稿日期:2010-12-11;修订日期:2011-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40973076)

作者简介:章巧秋(1986-),女,硕士研究生,主要从事环境与管理方向的研究;通讯作者:唐俊红(1964-),女,教授,博士,主要从事环境地球化学、同位素地球化学研究工作,E-mail:tang\_jhjh@163.com。

土壤是陆地表面能够生长植物的疏松表层,是地球上生命活动不可缺少的重要物质(林强,2004)。现代社会经济快速发展,工业废水、废气、废渣向环境中的土壤释放大量的重金属,生活垃圾、电子垃圾等固体废弃物在堆放的过程中也向土壤输送了部分重金属。这些累积在土壤表面的重金属污染物显然会对土壤性质和植被等产生严重危害,土壤中的污染物浓度将对长期居住和活动于此的人群(特别是儿童)产生较大危害(王亚宇,2008)。

多目标区域地球化学调查是针对第四纪覆盖区开展的基础性调查工作,主要目标包括基础地质、资源潜力与生态环境等三大方面(中国地质调查局,2005;陈国光等,2008;孙淑梅等,2008;王喜宽等,2008a,2008b)。民和县位于青海省海东地区,有“青海门户”之称。青海省多目标区域地球化学调查发现,民和县城—海石湾镇一带的狭长谷地,沿109国道两侧分布的土壤中存在以Cd、Pb、Hg、Cr等重金属元素为主组成的综合异常。进一步查明该异常成因、形成机理是多目标地质调查工作的任务之一(代杰瑞等,2010a)。因此,本文以民和—海石湾一带重金属元素为主的土壤异常区为研究对象,通过土壤水平剖面调查和垂直剖面调查,对其土壤重金属综合异常特征进行研究,重点是为了查明异常成因和异常源,为后续地球化学资料的解释和推断、农业地球化学区划及资源潜力预测等提供依据。

## 1 样品采集与分析

民和—海石湾地球化学调查中按DD 2005-01《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》的要求,采用网格法进行采样,每1 km<sup>2</sup>采集1件土壤表层样,每4 km<sup>2</sup>组成1件分析样;每4 km<sup>2</sup>采集1件土壤深层样,每16 km<sup>2</sup>组成1件分析样;分析与重金属污染和农业等相关的54项指标。经异常圈定发现,表层土壤中存在以Cd、Pb、Hg、Cr等重金属为主的综合异常。为进一步掌握异常的分布特征,查明异常成因及其来源,笔者根据异常的发育情况,在民和县城、海石湾镇布置了贯穿异常区的2条土壤水平剖面,分别编号剖面I和剖面II(图1),采集表层(0~20 cm)土壤样品。在民和县城水平剖面异常中心布置1个土壤垂向剖面(剖面A),海石湾镇水平剖面上布置2个垂向剖面(其中剖面B0距海石湾城区南约200 m,剖面B1距东恒砖厂南约400 m),分别

采集垂向剖面不同深度的土壤,从地表至地下1.6 m,每20 cm采集1个土壤样。

所有样品均送到国土资源部合肥矿产资源监督检查中心(安徽地质研究所)分析,样品分析与测试要求按照中国地质调查局制定的《多目标地球化学调查规范》(1:250 000)相关要求,进行各指标的规范化化验分析。

## 2 异常区地球化学特征

参考前人研究成果(张秀芝等,2006;汪庆华等,2007;曹峰等,2010),土壤环境背景值通常以元素含量统计特征值(平均值、标准差)表征,即在剔除异常含量值数据后,当统计单元内元素含量服从正态分布时,以平均值加减2倍离差值表示背景值的范围。研究区元素的背景值确定如下:将异常区网格土壤样品元素含量转换为相应对数值,求其对数平均值( $\bar{X}_L$ )和对数标准离差( $S_L$ ),用 $\bar{X}_L$ 加减 $3S_L$ 标准依次剔除离群数据,得到背景数据集,背景值即为背景数据集的算术平均值。海东地区地球化学调查将元素背景均值加2倍离差值定为异常下限,用Mapgis软件勾绘元素等量线圈定异常范围。异常圈定及异常筛选发现,海东地区北部存在由Cd、Pb、Hg、Cr元素组成的综合异常,主要分布在人口比较密集,工商业较为发达的109国道沿线,包括平安县、高店镇、乐都县、民和—海石湾等。异常主体位于民和—海石湾一带,其特点是异常范围大、强度高,大致呈南北向椭圆,以Cd、Pb、Hg、Cr为主的元素综合异常(图1)。异常沿109国道两侧分布,南北两侧被低山所围,位于狭长谷地。异常区地球化学特征见表1。

异常组分中,Hg异常面积最大,空间上各异常元素套合较好(图1),而且综合异常面积较大,异常元素衬度较高(表1)。

## 3 剖面元素分布特征和异常形成原因

异常区地质背景为第四系河床—河漫滩相灰白色砂砾石、浅灰褐色亚砂土。北部山区为元古界的二云石英片岩,南部为马兰黄土。异常区中部土壤类型为灰钙土,南北两侧为淡栗钙土。

### 3.1 民和县城剖面元素分布特征

民和县城土壤水平剖面(剖面I)元素空间含量变化(图2)显示,Cd和Hg的含量变化幅度大于Pb

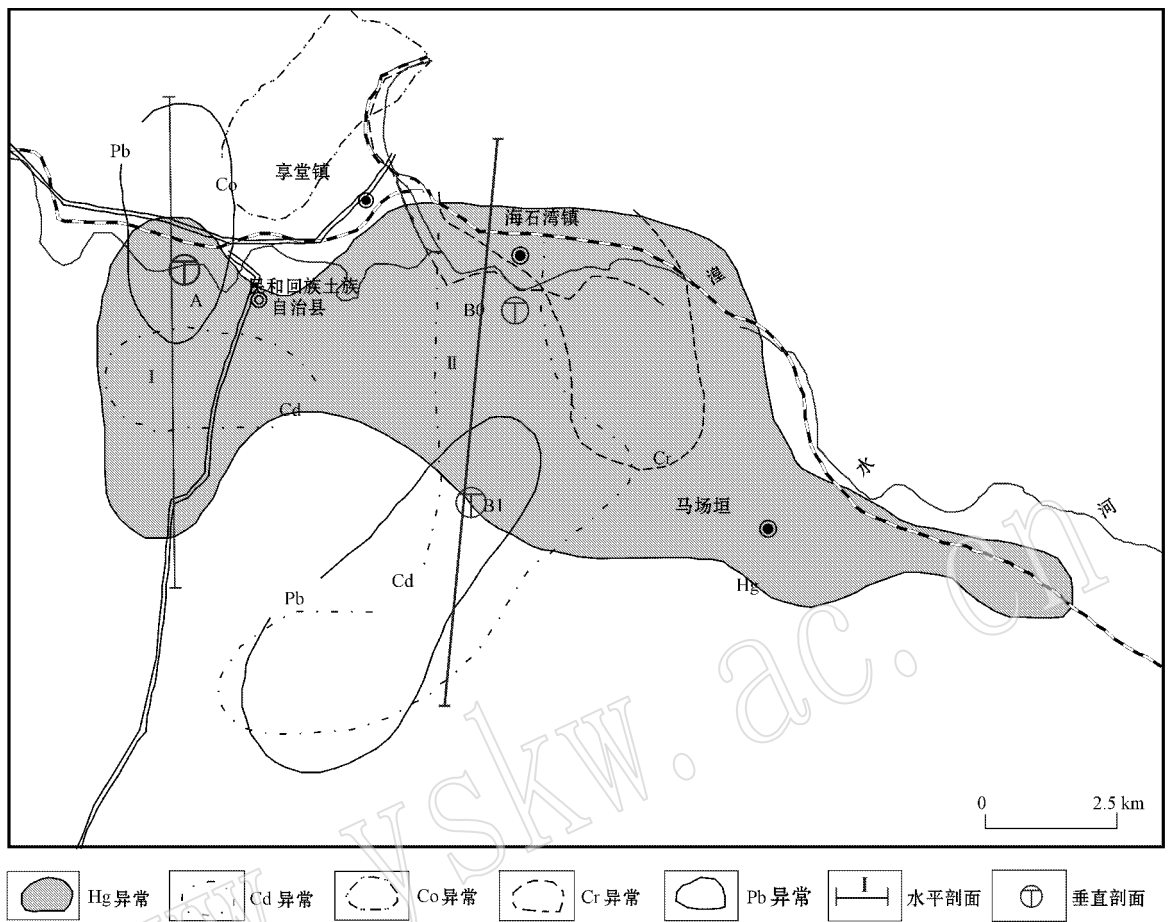


图 1 民和海石湾一带土壤重金属异常及查证工作布置图

Fig. 1 Distribution of anomalies and arrangement of verification engineering in Minhe and Haishiwan

表 1 民和海石湾一带土壤重金属综合异常地球化学特征

Table 1 Geochemical characteristics of comprehensive anomalies in Minhe and Haishiwan

元素	面积/km <sup>2</sup>	衬度	峰值	均值
Cd	32	1.12	331.5	298.64
Hg	80	1.76	115.0	70.33
Pb	24	1.03	29.5	27.87
Cr	12	1.02	87.9	86.63

注：Cd、Hg 元素单位为  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ，Pb、Cr 元素单位为  $\text{mg}/\text{kg}$ 。

和 Cr，且城区（样点 7、8、10、12、13、14、15）Cd、Hg 含量明显高于异常区北部的山前坡地、平地（样点 1、2、3、4、5、6）及异常区南部的黄土高地（样点 16、17、18），后者异常元素含量大幅下降，且维持在较平稳的含量水平。如民和剖面的 13、14 号点取自民和史纳村，居民密集，北约 100 m 即为铁路，此处 Hg 含量分别为  $189 \mu\text{g}/\text{kg}$ 、 $238 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，Cd 含量为  $292 \mu\text{g}/\text{kg}$  和  $322 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，至史纳村北山沟阶地中的 15 号点，Hg

含量迅速降为  $17 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，表现出异常元素在剖面 I 上的分布与人类活动的影响密切相关，同时土壤的性质不同（13、14 号点采集的土壤样性质为壤土，15 号点的土壤性质为含砾砂土）对其元素的含量也有一定影响。

民和县城土壤垂向剖面元素空间含量变化（图 3a，剖面 A）显示，虽然表层土壤富集程度不高，但富集现象明显；尽管在 0~20 cm 内土壤性质为粉砂土，142~162 cm 间为粘土，但各元素在前者中的含量均高于在后者中的含量。尤其是 Cd、Pb、Hg 分别在 0~134 cm、0~142 cm、40~142 cm 的范围内，随土壤深度的增加而含量下降。Cr 元素的表层富集现象虽不如其余 3 种元素明显，但总体上 Cr 元素仍表现出表层富集的趋势。

在深度 120~142 cm，土壤成分以砂土为主，上下均为粘土，在该区域内，Cd、Pb、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Hg 及有机质的含量几乎都低于其他深度，而 Cr 含量以及 pH

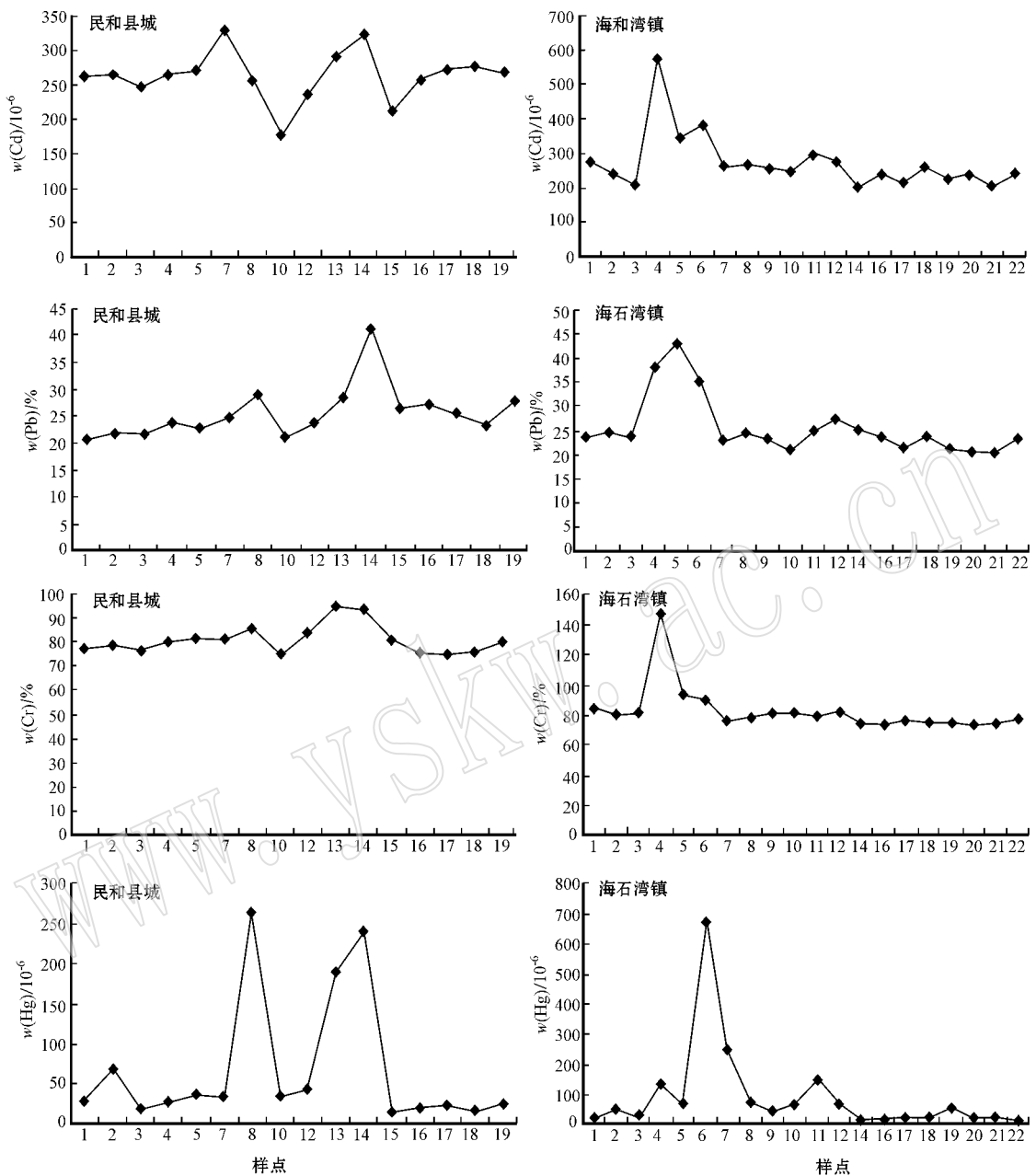


图2 民和县城、海石湾镇水平剖面元素空间含量变化

Fig. 2 Element concentrations of Minhe and Haishiwan horizontal profiles

值却高于其他深度,特别是在深度 134~142 cm 采集的土壤样中,Cr 含量高达 331.9 mg/kg,大约是其他深度土壤样中的 4 倍,Cr 在这一层中数值异常偏大,可能与成土母质以及土壤的特殊理化性质有关,具体原因有待进一步查证。

### 3.2 海石湾镇剖面元素分布特征

海石湾镇水平剖面元素空间含量变化与民和水平剖面相似(图 2),各元素变化趋势基本一致,极值

点出现在城区(样点 4、5、6、7、8),如 1、2、3 号点取自异常区北部的山前地带,4 号点取自民和县城大同路南侧的护路绿地,Cd、Hg、Pb、Cr 含量分别升高 2.4、1.6、4.0 和 1.8 倍。

与民和县城对比,海石湾镇土壤水平剖面上 Cd、Pb、Hg、Cr 的变异系数分别为 31、24、163、19,而民和县城 Cd、Pb、Hg、Cr 变异系数分别为 14、19、119、7。可见,海石湾镇土壤剖面上元素的变异系数

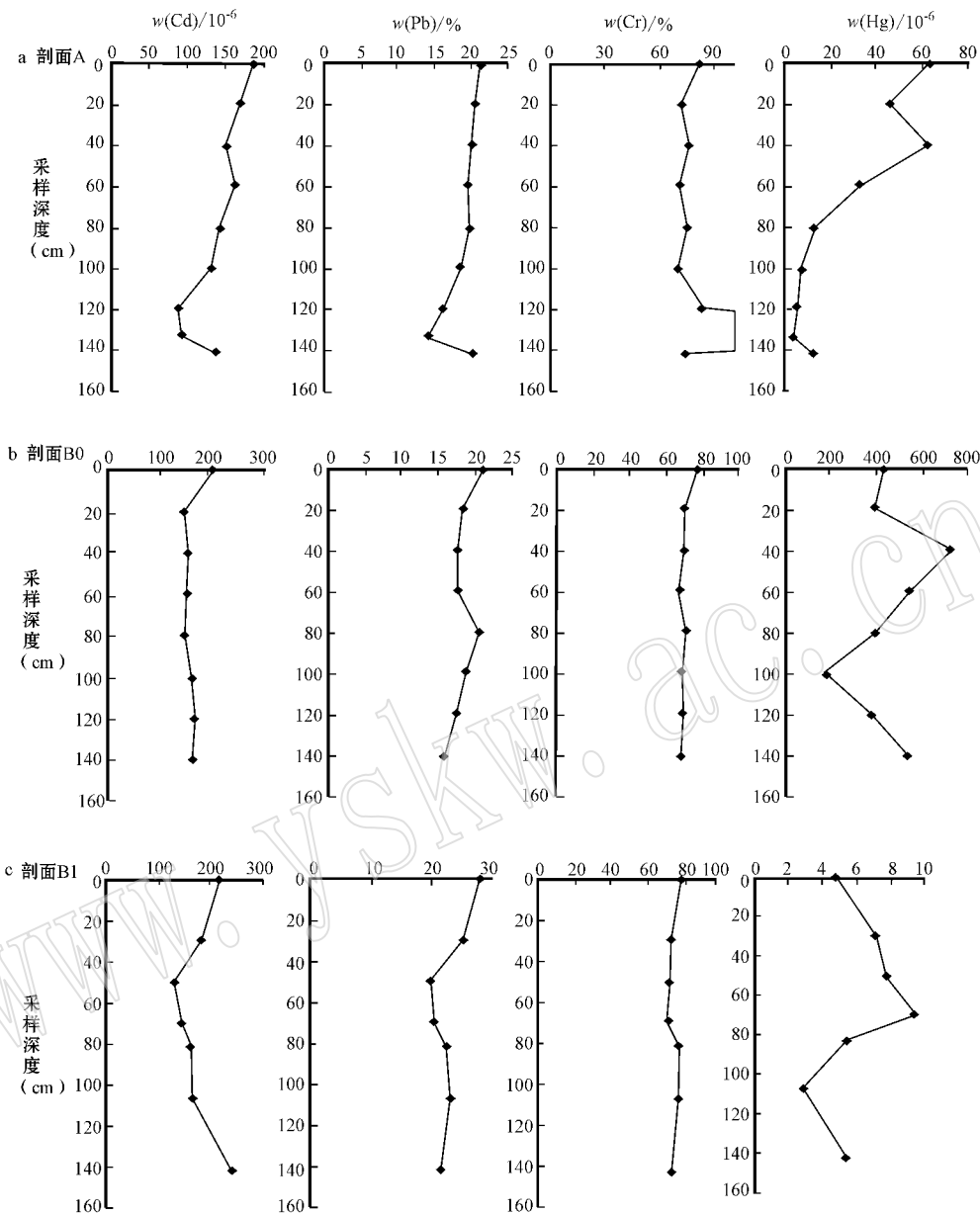


图 3 民和县城 a) 海石湾镇(b, c)垂直剖面元素空间含量变化

Fig. 3 Element concentrations of Minhe (a) and Haishiwan (b, c) vertical profiles

均大于民和县城剖面上对应的元素,说明各元素在民和县城水平剖面上的变化较海石湾水平剖面稳定。

海石湾土壤垂向剖面元素的空间含量变化情况类似于民和土壤垂向剖面,各元素在土壤表层均出现了不同程度的富集现象(如图 3 b, c 所示)。

### 3.3 异常成因分析

用 SPSS11.0 在显著性水平  $\alpha = 0.01$  上做 Pearson 积矩相关系数,经双尾检验,各元素之间的相关系数如表 2 所示。

自然状态下,重金属含量随  $\text{SiO}_2$  含量的增加而降低,随  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Corg}$  含量的增加而增加(代杰瑞等, 2010b)。Cr 元素在显著性水平  $\alpha = 0.01$  水平上与  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、有机碳这些土壤常量组分显著相关,其中与  $\text{SiO}_2$  含量呈负相关关系,说明土壤常量组分及其所决定的土壤质地是导致异常形成的一个因素。另外, Cr 元素含量在民和县城、海石湾镇水平剖面上的变化显示, Cr 元素在城区中的含量明显高于其他地方;土壤垂向剖面(图 3)显示,表层 Cr 元素富集现象虽不明显,但仍略高于深层中的含量,因

表 2 异常区各元素相关系数表

Table 2 Correlation coefficients between soil composition and heavy metals in the anomalous area

元素	Cr	Pb	Cd	Hg	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	有机碳
Cr	1							
Pb	0.570 **	1						
Cd	0.476 **	0.732 **	1					
Hg	0.396 **	0.417 **	0.506	1				
SiO <sub>2</sub>	-0.433 **	-0.146	0.091	0.167	1			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.642 **	0.599 **	0.563 **	0.349 **	-0.140	1		
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.692 **	0.455 **	0.329	0.173	-0.540 **	0.710		
有机碳	0.569 **	0.580 **	0.676 **	0.577 **	-0.072	0.420 **	0.284	1

注: \*\*表明在显著性水平  $\alpha=0.01$  水平上显著相关,  $N=54$ 。

此, Cr 元素具有双成因性质, 在较高自然背景上产生了人为源叠加。

重金属 Cd 与有机碳之间存在显著性相关关系, 与 TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不存在显著性相关关系, 而一般情况下, 自然成因的 Cd 元素在土壤中往往与有机碳、铁锰氧化物等吸附载体之间表现出较强的相关关系(张秀芝等, 2007, 2008), 说明异常元素 Cd 主要源于人为源输入; 民和县城及海石湾镇土壤水平剖面显示元素峰值出现在城区附近, 图 3 中 Cd 元素出现地表富集现象, 因此人为源输入是导致 Cd 元素异常形成主要因素。

在民和县城附近的土壤垂向剖面中(图 3a), Pb 元素含量随土壤深度的增加而降低, 这是因为 Pb 的地球化学性质不活跃, 不易淋溶迁移(罗杰等, 2009)。从图 1 看出除海石湾镇垂向剖面 B0 外, 其余两剖面均在 Pb 异常范围内。对比异常区和非异常区发现, 在 80 cm 以下的深度, 异常区和非异常区土壤中 Pb 含量相当; 而 80 cm 以上的土壤中, 异常区土壤中的 Pb 含量明显高于非异常区(图 3)。因此可以认为 Pb 异常元素基本只存在于表层土壤中, 这正是人为污染形成异常的特征。

民和县城土壤垂向剖面 Hg 元素空间含量变化(图 3a)显示, 表层土壤中元素含量明显高于深层土壤, 呈显著的表层富集特征, 自地表向下, 元素含量呈下降趋势。海石湾镇两个垂向剖面显示的 Hg 含量随土壤深度变化的空间特征虽不如民和县城垂向剖面明显, 但海石湾镇水平剖面中元素的空间变化(图 2)类似于民和县城水平剖面, 即城区土壤中的 Hg 含量远高于其他地方, 因此, 人类污染是该地区 Hg 异常形成的主要因素。

### 3.4 人为异常来源推断

异常区内分布有水泥厂、炼铁厂等多家工矿企业, 以煤为主要能源。据研究, 煤中有害微量元素有

22 种: Ag、As、Ba、Be、Cd、Co、Cl、Cu、Cr、F、Hg、Mn、Mo、Ni、Pb、Se、Sb、Th、Tk、U、V 和 Zn(任德贻等, 1999)。根据对煤中微量元素燃烧产物的分配研究, 难挥发元素包括 Cd、Pb、Cr、Mn、Cu、Zn 等, 主要分布在底灰中, 所占比例为 56.57%~83.76%, 飞灰中的比例一般低于 20%(王喜宽等, 2008b)。挥发性强的元素如 Se、Hg、As, 在飞灰中的比例与在底灰中相近甚至更高, 但两者的加和低于总量的 50%, 进入大气中的比例高于 50%(王起超等, 1996)。从异常区垂向剖面元素的空间分布来看, 主要异常元素在土壤表层均出现微弱富集(图 3), 这些特征说明人类活动是导致该地区重金属异常的重要原因, 而公路两侧堆放的煤渣和煤堆, 以及燃煤产生的烟尘是可能的污染源。

异常分布于民和海石湾一带 109 国道两侧, 且从土壤的 2 条水平剖面来看, 城区中的含量明显高于其他地方, 因此交通相对集中的地方污染要比其他地方严重。Pb 是汽油中主要的重金属元素, 汽车排放出的 Pb 附着在地表, 被粘土物质吸收, 在风力作用下形成浮尘(王喜宽等, 2008b)。因此, 人口越多, 汽车分布越密集的地方, Pb 含量相对较高, 如图 2 所示。

异常区早在上世纪 80 年代就被称为硅铁走廊, 工业较为发达, 但由于历史原因, 这些工业行业集中度低, 生产规模小, 产业链条短, 资源利用率低。工业企业的运转增加了 Cu、Cr 等重金属在当地土壤中的含量。

## 4 结语

通过异常查证, 民和海石湾一带土壤中的重金属异常确实存在, 该异常是由 Cd、Pb、Hg、Cr 等组成的综合异常, 其中 Cd、Pb、Hg 的异常主要由人类活

动造成,工业生产、燃煤、机动车尾气等是可能的人为污染源,Cr 异常是典型的地质背景下受人为综合因素产生的异常。建议控制污染源,科学施肥,对该地区的重金属异常应引起足够的重视。

## References

- Cao Feng, Li Ruimin, Wang Yi, *et al.* 2010. Soil geochemical baseline and environmental background values in northern Haihe plain, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 29(8): 1 215~1 219 (in Chinese with English abstract).
- Chen Guoguang, Xi Xiaohuan, Liang Xiaohong, *et al.* 2008. Soil geochemical baselines of the Yangtze River Delta and their significances [J]. *Geoscience*, 22(6): 1 041~1 048 (in Chinese with English abstract).
- China Geological Survey. 2005. Multi-Purpose Regional Geochemical Survey Standard 1:250 000 [M]. China Geological Survey Geology Survey Technology Standard DD2005-01 (in Chinese).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Wang Hongjin, *et al.* 2010a. Study on origins of heavy metal anomaly in soils from Jiyang County of Shandong Province [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 29(4): 406~410 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Wang Hongjin, *et al.* 2010b. The causes of the soil heavy metal anomalies in Pingyin County, Shandong province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 34(5): 659~663 (in Chinese with English abstract).
- Lin Qiang. 2004. The present status of soil pollution and countermeasures in China [J]. *Fujian Soil And Water Conservation*, 16(1): 25~28 (in Chinese).
- Luo Jie, Wang Shiji, Wen Hanhui, *et al.* 2009. Study on the rice Pb pollution in three cities of Zhejiang province [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37(10): 4 611~4 613 (in Chinese with English abstract).
- Ren Deyi, Zhao Fenghua, Zhang Junying, *et al.* 1999. A preliminary study on genetic type of enrichment for hazardous minor and trace elements in coal [J]. *Earth Science Frontiers*, 6(supplement): 17~21 (in Chinese with English abstract).
- Sun Shumei, Zhang Lianzhi, Yan Dong, *et al.* 2008. Experimental study on method and technique of land quality geochemical assessment [J]. *Geoscience*, 22(6): 998~1 002 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qichao, Shao Qingchun, Kang Shulian, *et al.* 1996. Distribution of 15 trace elements in the combustion products of coal [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 24(2): 137~142 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qinghua, Dong Yanxiang, Zheng Wen, *et al.* 2007. Soil geochemical baseline values and environmental background values in Zhejiang, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(5): 590~597 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xikuan, Zhang Qing, Liu Chen, *et al.* 2008a. Environmental geochemical characteristics of Soil in Linhe City, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 22(6): 948~953 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xikuan, Zhu Suo, Liu Dong, *et al.* 2008b. Results and significance of Multi-purpose Geochemical Mapping in the Hetao Area, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 22(6): 1 064~1 070 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yayu. 2008. Space distribution and accumulations in roadside trees of heavy metal in urban soil of Uruqi City [D]. Xinjiang: Xinjiang Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzhi, Guo Haiquan, Li Hongliang, *et al.* 2008. Distinguishing origins of elements in environmental geochemistry of Baiyangdian bilabong of Hebei province, north China [J]. *Earth Science Frontiers*, 15(5): 90~96 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzhi, Wang Sanmin, Li Jianhua, *et al.* 2007. Research on the enrichment and origin of cadmium in soils in a coastal area of east Hebei province [J]. *Earth And Environment*, 35(4): 321~326 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzhi, Yang Zhihong, Ma Zhongshe, *et al.* 2006. Geochemical background and geochemical baseline [J]. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 626~629 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 曹峰, 李瑞敏, 王轶等. 2010. 海河平原北部地区土壤地球化学基准值与环境背景值 [J]. *地质通报*, 29(8): 1 215~1 219.
- 陈国光, 奚小环, 梁晓红等. 2008. 长江三角洲地区土壤地球化学基准值及其应用探讨 [J]. *现代地质*, 22(6): 1 041~1 048.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 王红晋等. 2010a. 山东省济阳县土壤重金属元素异常成因研究 [J]. *岩矿测试*, 29(4): 406~410.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 王红晋等. 2010b. 山东省平阴县土壤中重金属元素异常成因 [J]. *物探化探*, 34(5): 659~663.
- 林强. 2004. 我国的土壤污染现状及防治对策 [J]. *福建水土保持*, 16(1): 25~28.
- 罗杰, 王世纪, 温汉辉等. 2009. 浙江三市水稻 Pb 污染原因研究 [J]. *安徽农业科学*, 37(10): 4 611~4 613.
- 任德贻, 赵峰华, 张军营等. 1999. 煤中有害微量元素富集的成因类型初探 [J]. *地学前缘*, (增刊): 17~21.
- 孙淑梅, 张连志, 闫冬. 2008. 吉林省德惠-农安地区土地质量地球化学评估 [J]. *现代地质*, 22(6): 998~1 002.
- 汪庆华, 董岩翔, 郝文等. 2007. 浙江土壤地球化学基准值与环境背景值 [J]. *地质通报*, 26(5): 590~597.
- 王起超, 邵立春, 康淑莲等. 1996. 煤中 15 种微量元素在燃烧产物中的分配 [J]. *燃料化学学报*, 24(2): 137~142.
- 王喜宽, 张青, 刘晨等. 2008a. 内蒙古临河市城市土壤环境地球化学特征 [J]. *现代地质*, 22(6): 948~953.
- 王喜宽, 朱锁, 刘东等. 2008b. 内蒙古河套地区多目标区域地球化学调查成果及其意义 [J]. *现代地质*, 22(6): 1 064~1 070.
- 王亚宇. 2008. 乌鲁木齐市土壤重金属空间分布及行道树对重金属的富集特征 [D]. 新疆: 新疆农业大学.
- 张秀芝, 郭海全, 李宏亮等. 2008. 河北省白洋淀洼地环境地球化学物源判断 [J]. *地学前缘*, 15(5): 90~96.
- 张秀芝, 王三民, 李建华等. 2007. 冀东沿海地区隔的富集程度及成因分析 [J]. *地球与环境*, 35(4): 321~326.
- 张秀芝, 杨志宏, 马忠社等. 2006. 地球化学背景与地球化学基准 [J]. *地质通报*, 25(5): 626~629.
- 中国地质调查局. 2005. 中国地质调查局地质调查技术标准 DD2005-01《多目标区域地球化学调查规范 1:250 000》[S].