

# 太原盆地重金属元素地球化学分布特征

王雄军<sup>1</sup>, 赖健清<sup>1</sup>, 孔 华<sup>1</sup>, 张建东<sup>1</sup>, 李德胜<sup>2</sup>, 周继华<sup>2</sup>, 王建武<sup>2</sup>

(1. 中南大学地学院, 长沙 410083; 2. 山西省地质调查院, 太原 030001)

**摘 要:** 研究了太原盆地土壤中 8 种重金属元素 As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn, Cu 的来源及分布规律, 首次计算了太原盆地区域土壤背景值, 分析了盆地中重金属元素的污染状况; 认为 Hg, Cd, As 的污染情况最为严重。用太原市和太原盆地的深、浅层数据作出 8 种重金属元素的多重分形图, 对 8 种重金属元素在生态环境中的影响作用进行了统计分析, 总结了重金属元素的分形规律, 得出各影响因素的相对重要性。

**关键词:** 重金属元素; 太原盆地; 地球化学; 多重分形

**中图分类号:** P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2008)03-0249-05

$\pm 2S$  5 逐步迭代剔除, 求其平均值<sup>[4]</sup>。表层样品直接计算其平均值。背景值见表 1。

## 0 引言

我国从 70 年代中期开始进行土壤调查研究、全国 1:20 万区域水系沉积物测量等地球化学调查, 但都由于缺乏系统性, 分析元素偏少, 研究程度受到限制<sup>[1]</sup>。谢淑云、鲍征宇认为地球化学元素分布规律的研究是揭示元素矿化富集及空间变化规律的重要途径之一<sup>[2]</sup>。Allegre<sup>[3]</sup>从理论上探讨了常态分布元素与超常富集的元素是否具有相同的分布规律问题。本文则主要对太原盆地土壤中的 Hg, Cd, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, As 等 8 种重金属元素进行探讨。

## 1 土壤中重金属污染物的分布

### 1.1 土壤背景值的获取方法

太原盆地的土壤背景值样品取自底层土。取样深度一般为 150 ~ 175 cm, 底层土壤基本代表了一个不受或很少受到人类活动影响的原始环境(即第 I 类环境)的特征。取样密度: 点/4 km<sup>2</sup>, 并由多点组合而成, 分析测试密度: 点/16 km<sup>2</sup> (即 4 个单点组合成一个分析样)。对样品的测试结果利用区域地球化学数据库管理系统 PGD 统计, 分布检验进行 5 X

表 1 土壤重金属元素的背景值

Table 1 The background values of heavy-metal in the soil

元素	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb
WB/10 <sup>-6</sup>	65.1	28.2	21.5	61.6	10.2	0.1	0.03	20

### 1.2 土壤重金属元素特征

利用化探数据, 采用地质专业软件做地球化学分布图(以 Hg 元素为例, 图 1), 结合盆地地理图对太原盆地各元素污染来源情况和危害进行对比分析。结果表明:

As 元素分布深表不一, 污染主要集中在中小城市, 且主要分布在盆地中间、晋中和南部孝义一带。

Cd 元素污染主要集中在太原市南端的万柏区、小店区一带; 祁县附近也有分布。它们的含量都超过了背景值, 属含量高值区。

Cr 元素表层高值区的分布区域明显增多, 主要分布在太原市一带小店区、寻谭区和孝义以及盆地中部一带。

Cu 元素深表分布表明其高含量区较少, 零星的分布。盆地北部集中在太原南部和小店区周围, 南部主要在孝义一带, 中部主要分布在祁县一带。这些都是盆地的矿区, 所以可以认为主要与采矿活动

收稿日期: 2007-06-19 改回日期: 2007-09-22

基金项目: 中国国土大调查项目(200314200020)、高等学校博士学科点专项科研项目(20030533012)资助。

作者简介: 王雄军(1979-)男, 湖南临武人, 博士研究生, 从事国土资源、地理信息的研究。E-mail: wxjcsu@126.com

有关。

Hg 元素的高值区与人的活动密集区关系非常密切,集中分布在太原盆地的主要城市周围,如北郊区、南郊区、榆次、太谷、平遥、介休、孝义和汾阳等地。

Ni 元素的高含量也分布在几个特殊地带,潇河中游、文水—平遥、孝义等。表层土壤中这些高含量地带仍然有显示,但高含量范围增大,强度局部升高,主要在潇河一带及孝义等地,这些高含量区是山

西省重要的乡镇炼铁与生铁铸造基地,Ni 元素可能来自铁矿石。

Pb 元素表层高值区明显的比深层增多,与交通图上的交通线基本吻合,且主要集中在太原市一带和主要交通线附近。表明 Pb 的污染主要来自交通工具。

Zn 元素分布在太原南部一带和小店区周围,零星点较多,高值点分布在主要的几个矿区和盆地中心。

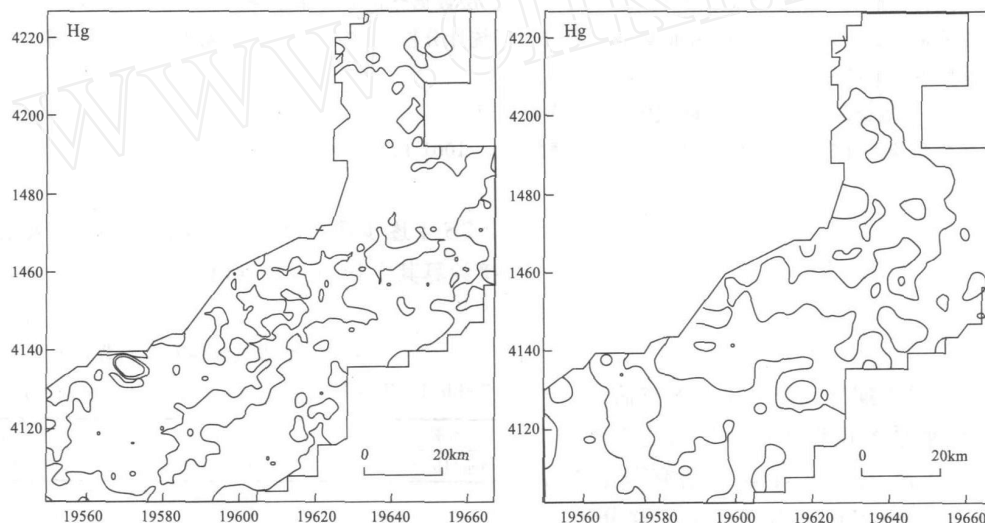


图1 太原盆地重金属元素表-深层地球化学对比图

Fig. 1 Geochemical graph of some heavy metal elements in the Taiyuan basin

盆地浅层样品数 1737 个;盆地深层样品数 432 个;左图为表层图,右图为深层图

## 2 重金属元素的分形特征

上个世纪 80 年代,数学家 Mandelbrot<sup>[5]</sup> (1982) 创立了分形几何学理论,它为人们研究描述自然界错综复杂、看起来是毫无规律的事物提供了有效的方法。分形理论作为非线性科学的一个重要分支,是研究自然界空间结构复杂性的一门学科,它可以从错综复杂的事物中提取确定性的参量。因此,分形理论在地质学的各个领域得到了广泛的应用。

对地球化学单元元素的分布规律研究通常采用以下两种简单方法: 采用直方图或概率图方法研究元素的概率分布; 用空间统计方法以及平面作图的方法来研究元素的空间变化性。分形与多重分形的方法能将这两种功能有机地融为一体<sup>[6]</sup>。

本文对太原盆地深层样和浅层样及太原市单点

样进行分析处理,选取其中 8 种重金属元素,对地球化学数据进行评价分析。

### 2.2 计算方法

地球化学采样点往往不是网格化的,局部区域可能采样较密或较稀甚或缺失。若直接应用原始样品分析数据进行元素含量频率分布研究,则可能过分强调采样较密的局部区域而相对忽视采样较稀的局部区域,难以真实地反映区域内元素含量值的分布特征<sup>[7]</sup>。浓度-面积法计算大于含量值  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $n$  为含量值分组数  $c_{\min} \quad c_i \quad c_{\max}$ ) 的面积  $S(C \geq c_i)$ ,然后在双对数坐标下考察  $c_i \sim S(C \geq c_i)$  间是否存在幂率关系即分形。对于  $S(C \geq c_i)$ ,Cheng 等<sup>[8]</sup>采用两种途径来确定: 在对原始数据加权移动平均 (Weighted moving average method) 插值后制作的地球化学等值线图上,  $S(C \geq c_i)$  为含量值  $C > c_i$  的等值线圈闭的区域面积; 统计原始含量数

值的盒子,即用边长确定的正方形网格覆盖研究区, $S(C > c_i)$ 等于具有含量值 $> c_i$ 的正方形网格数。如果在正方形中不止一个样品,则取平均值作为该网格的含量值。众所周知,等值线的计算意味着网格结点的估值运算,运用移动平均、距离系数加权移动平均、克里格法和泛克里格法等网格估值方法可能产生不同的效果;局部特高值点(outlier)可能使邻近网格点的估值普遍偏高,导致孤立高值点拉高一大片;内部的采样空白区也可能以很不准确的估计值来代替。由此看来,方法 存在固有的不足。本文采用方法 ,即面积校正累计频率法研究元素含量频率分布,其计算步骤如下。

以一网格覆盖采样区域。记采样空间坐标 $(x, y)$ 的最小值、最大值分别为 $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ ,则 $x$ 和 $y$ 方向的网格数和应满足:

$$(x_{\max} - x_{\min}) / n_x = (y_{\max} - y_{\min}) / n_y \quad (1)$$

$$d \cdot n_x \cdot n_y = n \quad (2)$$

(1)式表明方向应具有相同的网格间距;(2)式说明总网格数乘以平均网格密度 $d$ 应为总样品数 $N$ 。由(1)式、(2)式可解出 $n_x$ 和 $n_y$ ,从而确定所需的覆盖网格。平均网格密度 $d$ 值可取 $1 \sim 2$ ,使得采样较密区域的网格内有2个或2个以上样品,采样较稀区域的网格内有1个样品,部分网格内没有样品,即为采样空白区。过大的 $d$ 值会产生数据的“平滑”。本研究由于采样点为网格化的,所以我们将省去这一步,并采用的 $d$ 值为1。

计算各个网格元素含量平均值 $C$ ,并对 $C$ 值进行累计频率计算,即选定一组 $c = \{c_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 为非空网格数( $C_{\min} < c_i < C_{\max}$ ),统计所有网格平均值 $C$ 大于 $c$ 的网格数 $N(C > c)$ ,最后在双对数坐标下绘制 $c - N(C > 0)$ 曲线。因 $C$ 值反映了采样面积校正后的含量分布,作者称其为面积校正累计频率(Area-calibrated accumulative-frequency, ACAF)法,其结果与浓度-面积模型方法只相差一个常数,即单位网格的面积,不影响双对数坐标下曲线的形态。可见,ACAF法既消除了由于样品点分布不均一的影响,又不会因孤立高值点导致其邻近等值线畸变和难以剔除采样空白区等,且算法简单。

$c_i$ 值按下式确定:

$$c_i = C_{\min} \cdot \exp[(i - 1) / n_s], i = 1, 2, \dots, n_s \quad (3)$$

$$= (1 / n_s) \ln(C_{\max} / C_{\min}) \quad (4)$$

式中, $C_{\min}$ 为最小平均含量; $C_{\max}$ 为最大平均含量;为校正系数。

使得 $c_i$ 在对数坐标下为等距,否则容易导致数

据点在低含量区过稀而在高含量区过密,影响对其分布模式的总体认识。 $n_s$ 为计算累计频率的分组数,我们取为50。

图2给出了太原盆地和太原市区8种重金属元素修正的累计频率曲线,横坐标为元素质量分数,纵坐标为大于该元素质量分数的网格结点数,均为对数标度;各图都给出了直线拟合曲线方程。

### 2.3 讨论

从分形处理结果可以得出以下结论:

(1)曲线均显示连续多重分形特征,即在双对数坐标下为一连续曲线,而不是简单分形。

(2)双对数坐标下各元素质量分数的曲线有两近似线性段。第2近似线性段大致反映了介于检出限到测定下限之间或测定下限附近的低值波动;另一近似线性段跨越了主要的质量分数区间,反映了地球化学场的内禀分形特征;两者为连续过渡。参数 $b_1, b_2$ 为这两个近似线性段经最小二乘拟合的直线斜率的负值,即累计频率分布的幂率。重金属元素 $b_2$ 值大小为 $Zn > Cr > Pb > Cu > Ni > As > Hg > Cd$ ;由此看出该区污染较严重的重金属元素Cd和Hg的 $b_2$ 值较小,基本介于 $0 \sim 1$ 之间,而其他6种元素则相反。这可以解释为: $b_2$ 值越小(即直线越缓),自低值点到高值点的转化慢,表明有较多的高值点分布,污染发展趋势较强;反之, $b_2$ 值越大,则直线下降很快,其分布集中在低值区,污染发展趋势程度低一些。

(3)元素含量频率分布曲线上的两近似线性段之间为连续过渡,并没有截然的转折点,且第一直线段只反映了介于检出限到测定下限之间或测定下限附近的低值波动,因此不同于一些研究者根据两线性段的转折点作为异常下限值、污染区或者部分元素相对集中地区一些元素的地球化学背景和异常的结论。

(4)取各元素在两拟合直线中的交点值,并将其换算为元素质量分数值,发现盆地浅层元素As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn值比太原市的高,但Cr, Hg则相反,太原市要稍微高些。盆地和城市数据拟合交点值不一致的结果表明,用交点值作为背景值等的说法是不成立的。

(5)在一些图像中出现的星点状尾现象,而那些星点都是高值点,这可以解释为局部异常明显,而这样的星点状尾在太原市表现明显的有元素:Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn;浅层表现明显的元素为: Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn。说明这些元素在盆地和城市局部

污染源的存在且情况相对比较突出。

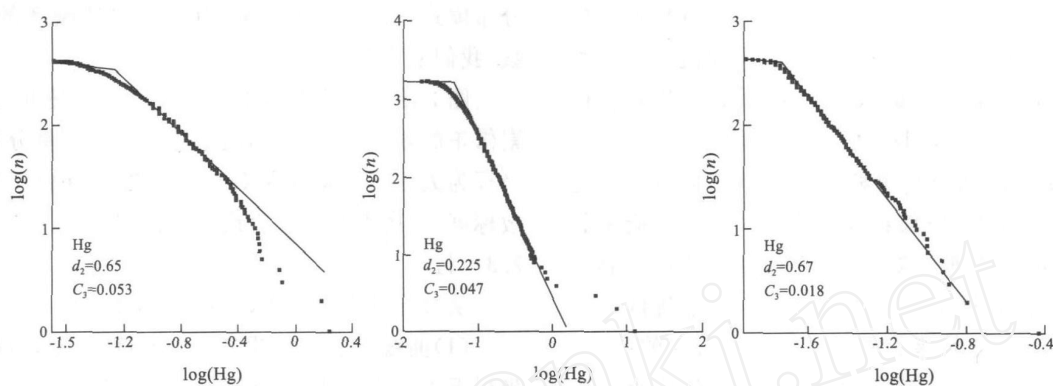


图2 重金属元素的双对数坐标曲线图

Fig. 2 Double logarithmic graph of some heavy metal elements

城市样品数 418 个,盆地浅层样品数 1737 个,盆地深层样品数 432 个,左图:城市,中图:浅层,右图:深层,  
 $b_2$  为这两个近似线性段经最小二乘拟合的直线斜率的负值, $C_j$  为拟合直线交点元素的质量分数

析其他元素和重金属元素的分形特征差异。

### 3 结论与建议

通过对太原盆地及太原市土壤中 8 种重金属元素来源、含量特征、空间分布规律及时间演变规律的研究,得出以下结论:

(1) 应用地球化学等值线图分析土壤污染来源,能很清晰地对比出表层与深层土壤元素的分布形态特征,并能有效地分析重金属元素的污染来源。

(2) 从对数曲线可以看出,该区污染较严重的重金属元素 Cd, Hg 自低值点到高值点的转化慢,表明有较多的高值点分布,污染发展趋势较为严重。

(3) 太原盆地浅层样的污染严重程度排序为  $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$ ; 太原盆地深层样的污染严重程度排序为  $Cd > Hg > As > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$ , 对比它们的结果表明与城市分析结果  $Cd > Hg > As > Ni > Cu > Pb > Cr > Zn$  基本一致。

(4) 生态环境地球化学是一门新兴学科,有很多需要解决的问题,而我们的研究也很局限,在有些问题上可能存在不全面的地方,还需要进一步的研究和探讨。

分形理论在生态地球化学上的应用是合理的,但在本次论文中研究元素的范围很窄,比如没有分

### 参考文献:

- [1] 王世青. 土壤环境容量数学模型[J]. 环境科学学报, 1993, 13 (1): 52-57.
- [2] 谢淑云, 鲍征宇. 地球化学场的连续多重分形模式[J]. 地质地球化学, 2003, 31 (3): 191-200.
- [3] Agterberg F P, Cheng Q, Wright D F. Fractal modeling of mineral deposits[C]. International Symposium on the Application of computer and Operations Research in the Mineral Industries. Amotreal: Canadian Institute of Mining Metellurgy and Petroleum, 1993: 43-53.
- [4] 兰雅莉. 环境地球化学三个领域的研究进展[J]. 河北工业科技, 2002, 19 (1): 14.
- [5] Mandelbort B B. The fractal geometry of nature[M]. 上海: 远东出版社, 1998: 15-20.
- [6] 谢淑云, 鲍征宇. 多重分形与地球化学元素的分布规律[J]. 地质地球化学, 2003, 31 (3): 97-102.
- [7] Salminen R, Tarvainen T. The problem of defining geochemical baselines. A case study of selected element sand geological material in Finland[J]. Geochemical Exploration, 1997, 60 (1): 91-96.
- [8] Cheng Q, Agterberg F P, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods[J]. J. Geochem. Explor., 1994, 51: 109-130.

## THE HEAVY METAL DISTRIBUTIVE CHARACTERISTICS OF THE SOIL IN TAIYUAN BASIN

WANG Xiong-jun<sup>1</sup>, LAI Jian-qing<sup>1</sup>, KONG Hua<sup>1</sup>, ZHANG Jian-dong<sup>1</sup>,  
LI De-sheng<sup>2</sup>, ZHOU Ji-hua<sup>2</sup>, WANG Jian-wu<sup>2</sup>

( 1. College of Geosciences and Environment Engineering , Central South University , Changsha 410083, China;

2. Shanxi Province Geological Survey , Taiyuan 030001, China)

**Abstract :** In this paper ,the sources and distribution law of 8 heavy-metal elements Cd ,Cr ,Hg ,Ni ,Pb , Zn ,As ,and Cu in the soil of the Taiyuan Basin were researched. The works and the achievements are as follows: The background values of the soil in Taiyuan basin were calculated first and the pollution status of the soil in the basin analysed suggesting the most serious pollution of Hg ,Cd ,As. Then the multifractal pictures of 8 heavy-metal elements have been drawn under pairs of logarithm coordinates by using the data of shallow and deep layers of the soil in the city and the basin. Environmental influences of the 8 heavy metals are statistically analysed ,fractal pattern of the heavy metals summerized giving their relative influence factors.

**Key Words :** heavy metal ;Taiyuan basin ;geochemical ;multifractal

## 欢迎订阅2009年《黄金》杂志

◎全国中文核心期刊  
◎中国期刊网  
◎美国化学文摘 (CA)  
◎中国期刊全文数据库  
◎中国核心期刊 (遴选) 数据库

◎中国科技核心期刊  
◎中国学术期刊 (光盘版)  
◎中国学术期刊综合评价数据库  
◎中文科技期刊数据库  
◎万方数据——数字化期刊群



《黄金》杂志于1980年创刊,是由中华人民共和国新闻出版总署批准、中国黄金集团公司主管、长春黄金研究院主办的黄金行业唯一的综合性科技期刊。主要报道黄金及其相关行业在经济管理、黄金市场、工业用金、黄金地质、采矿工程、机电与自动控制、选矿与冶炼、分析与环保等方面的科研成果和综合评述,以及新理论、新技术、新工艺、新设备、生产管理经验等内容,同时还开辟了信息纵横 (国内信息、国外信息)、读编往来等栏目。

《黄金》杂志具有权威性,内容翔实,信息量大,实用性强,覆盖面广,现已遍布黄金、有色金属、地质矿产、化工、机械、核工业、金融及金银饰品等行业。

《黄金》广告合理的价格定位,全方位的优质服务,为客户提供了理想的宣传平台。通过《黄金》广告宣传,有助于树立企业形象,创出企业名牌,提高企业知名度,促进产品销售,增加企业效益。

《黄金》杂志为月刊,国际标准刊号 ISSN 1001—1277,国内统一刊号 CN 22—1110/TF,国际刊名代码 CODEN HANGFV,彩色封面,64页,国际开本 (297mm×210mm)。邮发代号 12-47,全国各地邮局和我社发行部均可订阅。每册定价15.00元,全年180.00元。

地 址: 吉林省长春市南湖大路6760号 《黄金》杂志社发行部  
网 址: <http://www.ccgri.com/gold>  
电 话: 0431-85529838  
联系人: 李跃辉

邮 编: 130012  
电子信箱: [journal@ccgri.com](mailto:journal@ccgri.com)  
传 真: 0431-85521861