

58-64

# 地球化学场分解的理论与方法

孟宪伟 窦明晓

(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

p59

余先川

(长春地质学院岩化系 长春 130026)

**提 要** 由于多期地质地球化学作用的相互叠加,地球化学场通常表现为复杂的叠加场。在叠加场内,元素组合的成因特征、变差函数的多级套合结构和多标度分形谱能有效地反映地质地球化学的多期性。相应地,用 R 型因子分析法、单变量因子克立格法和多标度分形谱便能有效地实现地球化学场的分解。

**关键词** 地球化学场, R 型因子分析, 分解, 因子克立格, 多标度分形

## 0 引 言

在大比例尺地球化学域内,经历了多种地质作用的叠加,地球化学场通常表现为复杂的叠加场;地球化学变量自身也不再是简单的随机变量,而是复杂的区域化变量。按地质成因,叠加的地球化学场可分为地球化学同生场和地球化学叠加场两大部分。同生场反映成岩作用的元素分布,叠加场反映后期蚀变矿化作用的元素分布;两者代表的是性质和意义截然不同的两种地质地球化学作用过程。地球化学场的分解就是将地球化学场按地质成因分解,使原始的观测数据分解为同生场数据和叠加场数据两部分,其中叠加场因与矿化作用相联系,又可称其为异常场,即地球化学异常。因此,地球化学场分解对于地球化学预测具有重要的实用意义。

不同的地质地球化学作用过程通常表现为与之相应的元素组合、变差函数的多级套合结构和多标度分形谱,因此,本文提出用 R—型因子分析法、单变量因子克立格法和多标度分形谱实现地球化学场的分解。

## 1 R 型因子分解法实现地球化学场的分解

### 1.1 地球化学场分解的模型

收稿日期:1993—11—10,修改稿:1994—03—28

赵玉祥(1987)提出了用 R 型因子分析方法实现地球化学场分解的基本思想<sup>[1]</sup>。地球化学场分解的化学模型就是元素组合的成因专属性。不同的地质作用必定形成独特元素组合形式;而某特定的元素组合形式能够反映地球化学作用的特定环境。

地球化学场分解的数学模型就是 R 型因子分析。因子分析能够归纳和提炼元素的组合,通过元素组合的成因专属性可以推断和解释地质成因和地球化学作用过程;因子分析还能将混合型原始数据形态转换成不同成因的数据形态,好比连结原始观测数据与地质成因的一座桥梁。借助因子分析模型进行“逆演”计算,便实现了地球化学场的分解。

## 1.2 原理和方法

$$R \text{ 型因子分析模型: } Z = F \cdot A' \quad (1.1)$$

其中,  $Z$  为标准化变量,  $F$  为公因子,  $A$  为因子载荷。

如果在因子分析结果解释时,把代表不同元素组合的公因子分别赋予成岩意义和成矿意义(令  $f_1, f_2$  为成岩因子;  $f_3, f_4, \dots, f_k$  为矿化因子),则因子分析模型可写成分块矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1m} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{nm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1k} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{km} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

式中,  $n$  为样品数,  $m$  为变量数,  $k$  为公因子数。

$$\begin{aligned} \text{令 } F_1 &= \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ \cdots & \cdots \\ f_{n1} & f_{n2} \end{bmatrix} & A'_1 &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \end{bmatrix} \\ F_2 &= \begin{bmatrix} f_{13} & f_{14} & \cdots & f_{1k} \\ f_{23} & f_{24} & \cdots & f_{2k} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f_{n3} & f_{n4} & \cdots & f_{nk} \end{bmatrix} & A'_2 &= \begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3m} \\ a_{41} & a_{42} & \cdots & a_{4m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k1} & a_{k2} & \cdots & a_{km} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\text{则 } Z = (F_1 \quad F_2) \begin{bmatrix} A'_1 \\ A'_2 \end{bmatrix} = F_1 A'_1 + F_2 A'_2 \quad (1.3)$$

$$\text{令 } Z_1 = F_1 A'_1, \quad Z_2 = F_2 A'_2$$

$$\text{则 } Z = Z_1 + Z_2 \quad (1.4)$$

此式表明,任一样品任一元素的含量  $Z_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$ ) 是由成岩作用分量  $Z_{1ij}$  和矿化叠加分量  $Z_{2ij}$  两者合成的结果。 $Z_1$  和  $Z_2$  的计算过程就是所谓的“逆演”。

## 1.3 地球化学场分解实例——黑龙江省团结沟金矿床金元素地球化学场的分解

团结沟金矿床原生晕微量元素 R 型因子分析结果为:代表矿区地质作用的因子有六个(给定方差贡献为 70%)。其中,  $F_1, F_3, F_5, F_6$  代表的元素组合为 Cu, Pb, Zn, Sb, Bi, As, Au, Ag, W, Sn, Mo, Hg;  $F_2$  代表的元素组合为 Cr, V, Mn, Co, Ni;  $F_4$  代表的元素组合为 F, K。根据矿床地质特征和原生晕空间分布特征,认为  $F_1, F_3, F_5$  和  $F_6$  是成矿成晕元素组合;  $F_4$  是矿化剂元素组合,  $F_1$  和  $F_3 \sim F_6$  都是成矿作用的产物;  $F_2$  为造岩元素组合,是成岩作用的产物。因此,可以认为  $F_1, F_3 \sim F_6$  是成矿因子,  $F_2$  为成岩因子,成岩作用分量和成矿作用分量

$Z_1$  和  $Z_2$  分别由下式计算:

$$Z_{1ij} = f_{i2} \cdot f_{2j} \quad (1.5)$$

$$Z_{2ij} = \sum_{p=3}^6 f_{ip} \cdot a_{pj} + f_{i1} \cdot a_{1j} \quad (1.6)$$

式中,  $i$  代表样品,  $j$  代表变量,  $f_{ip}$  为因子得分,  $a_{pj}$  为因子载荷;  $Z_{1ij}$  和  $Z_{2ij}$  分别代表了在第  $i$  个样品中第  $j$  变量的成岩作用和成矿作用的标准化分量。  $Z_1$  和  $Z_2$  是一套各自代表同生场和矿化叠加场标准化数据。

图 1 是用金元素的叠加场标准化数据  $Z_2$  做的地球化学图。金在叠加场的分布范围代表了矿化范围(或原生晕), 展布方向代表了控矿构造方向——东西向和北西向。

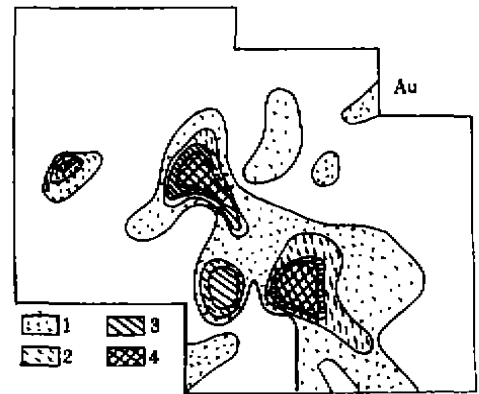
## 2 单变量因子克立格方法实现地球化学场的分解

### 2.1 地球化学场分解模型

地质作用的叠加在变差函数上表现为具有多级套合结构<sup>[2]</sup>。用单变量因子克立格方法实现地球化学场分解的基本模型就是变差函数的多级套合模型(没有考虑块金效应), 即:

$$\gamma(r) = \gamma_1(r) + \gamma_2(r) \quad (\text{变程 } a_2 > a_1)$$

(2.1)



1.  $X$  3.  $X + 0.5s$   
2.  $X + 0.25s$  4.  $X + s$

图 1 金元素叠加场地球化学图

如果把套合结构中不同尺度成分(按变程  $a$  大小划分)赋予不同的地质意义, 把大尺度成分  $\gamma_2(r)$  看成是代表区域成矿(成岩)作用, 而把小尺度成分  $\gamma_1(r)$  看成是后期成矿作用的叠加, 那么, 整个变差函数的套合结构就可以看成是多种地质作用叠加的结果。地球化学场分解的实质就是把代表小尺度成矿作用的  $\gamma_1(r)$  分离出来, 以  $\gamma_1(r)$  结构代表的成分编制地球化学图。它实质上就是地球化学异常图。

### 2.2 原理与方法

马特隆(1982)提出了单变量因子克立格法的一般理论。在单变量情况下, 设区域化变量  $Z(x)$  是二阶平稳随机函数  $Z(x)$  在已知点  $x$  处的一个实现(观测或取样),  $Z(x)$  具有如下分解形式<sup>[3]</sup>:

$$Z(x) = \sum_{n=1}^N Y^n(x) \quad (2.2)$$

其中  $Y^n(x)$  是相互正交的平稳随机函数。这个分解形式直接对应于套合变差函数:

$$\gamma(r) = \sum_{n=1}^N \gamma_n(r) \quad (2.3)$$

也就是说,  $Y^n(x)$  分别对应于空间某种尺度的变差函数  $\gamma_n(r)$ 。而  $Y^n(x)$  的估计值  $\hat{Y}^n(x)$  可以用线性克立格法求得, 即用实测值  $Z_o$  与  $\lambda_o^n$  的加权线性组合表示:

$$\hat{Y}^n(x) = \sum_{o=1}^N \lambda_o^n Z_o(r) \quad (2.4)$$

求解  $\hat{Y}^n(x)$  的实质就是求权系数  $\lambda_o^n$ 。在无偏、最优条件下, 可以求出每个  $\hat{Y}^n(x)$  关于  $\lambda_o^n$  的  $N+1$  个方程的方程组:

$$\sum \lambda_i^0 \gamma(X_\alpha, X_\beta) + \mu_\alpha = \gamma(X_\alpha, X) \quad (2.5)$$

$$\sum \lambda_i^0 = 0 \quad (2.6)$$

式中的  $\mu_\alpha$  为拉格朗日乘子。

针对我们的目的应有:  $\gamma(r) = \gamma_1(r) + \gamma_2(r)$ ,  $Z(x) = Y^1(x) + Y^2(x)$ 。我们要分离的是小结构变差函数  $\gamma_1(x)$  所对应的成分  $Y^1(x)$ , 则上述方程组变为:

$$\sum \lambda_i^0 \gamma(X_\alpha, X_\beta) + \mu_1 = \gamma_1(X_\alpha, X) \quad (2.7)$$

$$\sum \lambda_i^0 = 0 \quad (2.8)$$

$$\text{写成矩阵形式: } [K][\lambda_i] = [M] \quad (2.9)$$

该方程组的解法与普通克立格方程组的解法完全相同, 只需把  $[M]$  中的前  $N$  项变成  $\gamma_1(r)$ , 第  $N+1$  项变成零。

求出权系数后, 便可根据式(2.4)求出  $Y^1(x)$  值。用这套数据作图, 便形成了地球化学异常图。

### 2.3 地球化学场分解实例——黑龙江省团结沟金矿外围 1:1 万金元素地球化学场的分解

金元素 4 个方向 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ ) 的实验变差函数 (如图 2)。图 2 中金元素的 4 个方向的变差函数具有各向同性的特点, 因此可用平均实验变差函数代表其空间结构 (图略)。在进行理论拟合时, 只有用套合结构模型才能较好拟合其平均实验变差函数的前几个点。拟合的理论参数为  $C_0 = 0.20$ ,  $C_1 = 0.06$ ,  $C_2 = 0.12$ ,  $a_1 = 600\text{m}$ ,  $a_2 = 1300\text{m}$  ( $C_0$  为块金常数,  $C_1$ 、 $C_2$  为基台值,  $a_1$ 、 $a_2$  为变程)。以  $a_1$  和  $C_1$  做为小尺度变差函数  $\gamma_1(x)$  的参数, 求出  $Y^1(x)$  的估计值  $Y^{1*}(x)$ , 以这套数据作图, 便得到了金的地球化学异常图 (如图 3)。

用单变量因子克立格方法圈定的地球化学异常具有成因意义, 基本能够反映控矿因素的特点。如图 3, 异常的总体展布方向为北东向或东西向, 但异常浓集中心的展布或排列方向却为北西向。矿田构造分析表明, 东西向和北东向构造代表了控岩构造, 北西向构造是直接的控矿构造, 二者的

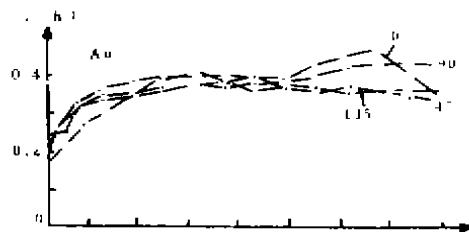


图 2 金丰度在四个方向上的变差函数

叠加对成矿最有利。由此可见, 用单变量因子克立格方法圈定的地球化学异常突出了控矿因素的特点。

## 3 多标度分形谱实现地球化学场分解

### 3.1 原理与方法

分形理论指出<sup>[4]</sup>, 如果某一随机过程可以用各种等级的空间尺度等几率去描述, 那么由该过程形成的物体或产生的现象具有分形特征。简单的地球化学场 (小比例尺观测) 可以认为是由这种随机过程形成的景观。用分形几何方法描述其特征是可行的。但是, 在叠加的地球化学场内, 各种地质作用并不等几率发生, 分别形成各自的地球化学景观自相似特征, 因此地球化学场往往具有多标度分形。多标度分形的空间标度范围分别与不同的地质作用相关联, 求多标度分形谱的过程实质上就是地球化学场分解的过程。

目前较常用的求多标度分形谱的方法仍是变差函数法。

对于某一具有分形特征的地质表面或地质场, 变差函数满足下列方程 (B. Boiviken, P. R. et al., 1992):

$$\gamma(h) = (h/\lambda)^{2H} \quad (3.1)$$

式中  $h$  为空间步长,  $\lambda$  是常数,  $H$  是 Hurst 指数, 它与分维  $D$  之间存在如下关系:

$$H = 3 - D_s \quad (3.2)$$

把方程 (3.1) 取对数, 做  $\log \gamma(h) - \log h$  散点图。根据双对数图分析地球化学场的分形特征。

如果在某一空间尺度范围内, 散点的分布可以用一条直线来拟合, 则表明所研究的地球化学场具有分形特征。直线的斜率为  $2H$ , 根据 (3.2) 式便可求出分维值  $D_s$ 。 $D_s$  的大小反映了地球化学场的复杂程度。但是, 更多的情况是  $\log \gamma(h) - \log h$  散点图不能用一条直线很好地拟合, 而需要两条或更多的折线段来拟合, 每一条折线段都与一定的空间尺度 (水平投影) 相对应, 且有各自的分维 (斜率不同), 这便称作多标度分形。多标度分形反映了地球化学场的叠加, 分解多标度分形所对应的空间标度, 并与地质作用相关联, 便可进行地球化学场的分解。

### 3.2 多标度分形谱分解实例——黑龙江省团结沟金矿外围 1:1 万金元素地球化学场的分解

金元素 4 个方向的变差函数如图

2, 对其平均实验变差函数取对数, 做如下  $\log \gamma(h) - \log h$  散点图 (如图 4)。

图 4 中, 在  $0 \sim 1.2 (0 \sim 1580 \text{m})$  空间尺度范围内的散点分布明显为单调上升趋势, 但需用两条折线才能较好地拟合。两条折线之间为渐变过渡, 各自对应的空间标度范围为  $0 \sim 0.8 (0 \sim 630 \text{m})$  和  $0.8 \sim 1.2 (630 \sim 1580 \text{m})$ , 斜率分别为 0.54 和 0.84, 分维为 2.37 和 2.58。

仅从多标度分形的各自空间标度看, 这种结果与用单变量因子克立格方法求得的变程  $a_1 = 500 \text{m}$  和  $a_2 = 1300 \text{m}$  大致相同。至此, 说明了用多标度分形谱实现地球化学场的分解既直观, 又简单, 也可靠。



图 3 Au 的地球化学异常图

1— $8 \sim 28$ ; 2— $28 \sim 48$ ; 3— $>48$ ;

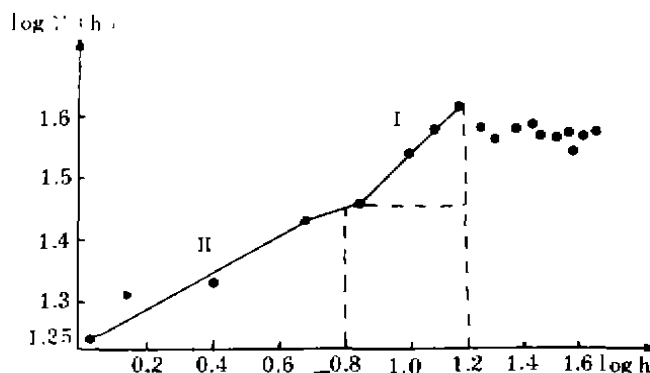


图 4  $\log \gamma(h) - \log h$  散点图

地球化学场分解的理论和研究方法研究目前尚属萌芽阶段。但是,当我们强调地球化学是系统科学、地球化学预测是系统工程时,地球化学场分解的理论和研究方法研究势必加深我们对地球化学系统的认识,积极、有效地进行地球化学预测。从这一点看,地球化学场分解的理论和方法应该引起足够的重视。

#### 主 要 参 考 文 献

- [1] 赵玉祥. 地球化学场的分解及应用. 物化探计算技术, 1987, 2.
- [2] 王仁铎, 胡光道. 线性地质统计学. 地质出版社, 1988.
- [3] Jaquet O. Factorial kriging analysis applied to geological data from petroleum exploration. Math Geology, 1989, (7): 683—691.
- [4] Bolviken B P R et al. The fractal nature of geochemical landscapes. J Geochemical Exploration, 1992, 43: 91—109.

## THEORIES AND METHODS ON THE DISPERSION OF GEOCHEMICAL FIELD

Meng Xianwei Dou Mingxiao

(*Institute of Geochemistry, Academia Sinica, Guiyang 550002*)

Yu Xianchuan

(*Changchun College of Geology, Changchun 130026*)

### Abstract

In the exploring geochemical region of the large scale, the geochemical varieties are regionalized, and geochemical field is showed as compounded. A variety of geochemical functions may be reflected by different elemental associations, multiplicate variograms and multifractals. And so, the methods of R-mode factor analysis, single-variate factor Kriging and multifractals are used in the present paper, to disperse the compounding geochemical field.

**Key words:** Geochemical field dispersion, R-mode factor analysis, Factor Kriging, Multifractals.