

分类号 \_\_\_\_\_

学校代码: 10616

UDC \_\_\_\_\_

密级 \_\_\_\_\_ 学号: \_\_\_\_\_

# 成都理工大学硕士学位论文

若尔盖地区金地球化学异常数据处理研究

李 河 江

指导教师姓名及职称 \_\_\_\_\_ 巫晓兵 副教授 张成江 教授

申请学位级别 \_\_\_\_\_ 硕 士 专业名称 \_\_\_\_\_ 地球化学

论文提交日期 \_\_\_\_\_ 2006.05 论文答辩日期 \_\_\_\_\_ 2006.05

学位授予单位和日期 \_\_\_\_\_

答辩委员会主席 \_\_\_\_\_

评阅人 \_\_\_\_\_

2006 年 5 月

# 若尔盖地区金地球化学异常数据处理研究

作者简介：李河江，男，1976年2月生，2003年9月师从于巫晓兵副教授、张成江教授，2006年7月毕业于成都理工大学地球化学专业。

## 摘 要

勘查地球化学数据处理的核心是有关地球化学背景与地球化学异常的合理确定和圈定的问题；从大量原始勘查数据中发现与矿化有关的地球化学信息是异常数据处理研究的目的。

勘查地球化学数据处理研究中使用的许多方法，通常是把各种地质现象作为相互独立的随机变量来处理，把数据分布作为一种光滑（处处可微）的连续曲面进行拟合。这与地壳中元素与矿化统计所提示的非线性特征是不相一致的。

本文在总结前人研究基础上，分别采取常用方法、数据滤波法和分形理论及方法，对若尔盖阿细龙曲地区进行金地球化学异常数据评价和研究。实践证明，用分形理论和方法能够快速、准确地确定区域金背景值和金异常下限，勾绘的金地球化学异常经过实地查证，反映了本区金矿化特征，为该区金矿勘查和研究提供了一种有效的找矿方法和手段。

**关键词** 金 地球化学背景、异常 若尔盖 分形理论 GIS

## **ABSTRACT**

The essence of exploitation geochemistry data processing is the identification of the geochemistry background and geochemical anomaly and the anomalistic data processing aims at finding out geochemical information on ore from abundance of original data which were got in reconnaissance.

Many methods for analytical data in chemical exploration usually regard various geo-phenomena as random variables, and data distribution as a kind of smooth curved face. These are not consistent with the nonlinear feature hinted by mineralization statistics and elements in earth crust, and not all of the geo-phenomena result from random process.

This thesis has individually evaluated the unusual geochemistry phenomena from traditional method and fractal method at Axilongqu in Ruoergai on the basis of former related documents. Compared to traditional method, fractal method can determine the unusual minimum element more quickly and precisely. And the method can not only efficiently simulate the features of spatial distribution, but also reasonably differentiate the background value from the anomaly geo-chemical value on the basis of retaining primary effective information.

**Key words:** aurum, geochemical background and anomaly, Ruoergai, fractal theory, geographical information system.

# 1 前 言

勘查地球化学数据处理是应用数学方法从地球化学原始数据中提取指示元素的信息，揭示指示元素含量（变量）与各种地质现象的内在联系。其结果和图示信息又为异常圈定、异常评价和靶区筛选找矿提供有效的研究和服务。

2004 年——2006 年，本人参加导师巫晓兵副教授“四川省若尔盖县阿细龙曲金矿成矿地质特征对比研究及找矿远景分析”的研究工作，在导师巫晓兵副教授的指导下，进行“若尔盖阿细龙曲地区金地球化学异常数据处理研究”。目的是通过对勘查地球化学数据处理方法的比较并结合本区金矿化实际，首次应用分形理论和方法合理圈定本区金矿找矿靶区。

## 2 选题的依据和意义

本论文的选题依据是：

2.1 2003 年，导师巫晓兵博士以“特邀专家”身份受聘于四川省核工业地质调查院，进行“四川省若尔盖县阿细龙曲金矿成矿地质特征对比研究及找矿远景分析”研究，为本人从事硕士论文研究提供了良好的物质条件，特别是大量的第一手资料和分析数据，同时也可以对研究成果及时进行野外查证；

2.2 该论文着重探索、解决四川省核工业地质调查院在金矿找矿过程中面临的金地球化学异常筛选问题，为在本区合理有效地进行金矿勘查、找矿提供了一种新的理论方法和手段；地质找矿单位目前也迫切需要进行新理论应用研究。

2.3 在川北“金三角”地区，前人尚未做过此方面的勘查地球化学研究，通过本项研究，若能起到良好的金异常数据处理和靶区圈定效果，将会对以后该地区的金矿找矿勘查起到良好的推动作用，同时也会使这种处理方法具有重要的理论应用和较强的社会经济价值。

### 3 勘查地球化学异常数据处理的一般原理、方法概述

#### 3.1 勘查地球化学的基本原理

勘查地球化学是在不同比例尺与规模上系统地研究地壳、特别是各种地质体中元素的组成、分布与变化,并应用地球化学理论和方法,进行多目标研究应用的科学。

##### 3.1.1 地球化学背景

地球化学背景是指“在无矿或未受矿化影响的地区,区内的地质体和天然物质没有特殊的地球化学特点,且元素含量正常,这种现象称为地球化学背景,简称背景。”(陶正章,1981)。

地球化学背景有狭义与广义之分,狭义的地球化学背景是指:在不受矿化作用影响或没有矿石碎屑混入的地区中,化学元素的一般含量和变动幅度(倪师军,2003.6)。广义的地球化学背景则是对勘查地球化学而言的,其概念要根据对象的变化而变化。比如说农业地球化学勘查、环境地球化学勘查等的地球化学背景就不是以矿化元素为对象,而是以土壤肥料化学元素或污染物化学元素作为研究对象的。通常来说,勘查地球化学背景值的确定是以所要研究和解决问题的关键性化学元素为依据对象。换言之,凡是调查对象影响的范围以外的地区,就叫背景区。那里的化学元素的一般含量及一般变化幅度就叫背景值。

地球化学背景值的概念是一个变量,取决于研究内容和研究地区等因素。从研究内容来看,不同的研究对象在同一地区其地球化学背景的含义和背景值是不相同的。从研究地区来看,相同的研究对象在不同的地区其地球化学背景的含义和背景值也是不相同的,所以有全球背景值、大构造圈背景值、区域背景值等之分。另外在研究地区地球化学背景值不是唯一确定的值,而是在一定范围内不规则的波动和变化值。一个地区如果没有地球化学异常,并不能说明该异常元素在该地区缺失或不存在,而有可能是由于该化学元素的含量被地球化学背景的波动值所掩盖。如果采用合理的数据处理方法,常常可以揭示一些被掩盖的地球化学异常,这是地球化学背景研究的一个新发展。

##### 3.1.2 地球化学异常

相对于地球化学背景而言,地球化学异常(区)是指与地球化学背景有显著差异的元素含量富集区或贫化区。在异常区内各种自然介质中,元素的含量与周围背景有明显差异,该元素的含量值称为地球化学异常值,简称异常。

描述异常的参数主要有以下几个:异常下限、异常衬度、异常强度、异常面积、异常规模、异常浓度分带性和综合异常组分特征等。

**异常下限** 又称背景上限,它是划分异常与背景的临界值。大于或等于此值者为

异常，小于此值者为背景。

**异常衬度** 异常衬度是指某一指示元素所形成的异常含量平均值与异常所在区域该元素的背景平均值的比值。

**异常强度** 是指元素含量值的大小。可用该元素异常含量平均值来度量。如果异常多为高含量值组成，也可以用异常的最高含量值度量。

**异常面积** 是指异常下限所圈定的异常范围。

**异常规模** 是一个综合了异常强度与面积之后而提出的一个参数值。往往用异常线金属量或异常面金属量来度量。异常线金属量是为了对比各剖面异常的规模大小而设定的一个参数。异常面金属量也是表达异常规模的一个常用参数，是用异常范围内的异常含量平均值，减去异常外围的背景平均值，乘以异常面积。

**异常浓度分带性** 也称为异常浓度梯度。异常浓度梯度值越大，说明元素所形成的异常具有很好的分带性；异常浓度梯度值越小，说明元素所形成的异常分带性越差；异常浓度梯度值趋于零时，元素异常不具分带性。

**综合异常组分特征** 是由多个指示元素组合反映出的地球化学异常特征。

## 3.2 常用异常数据处理方法

常用的方法多基于经典统计学的方法，它要求分析数据服从正态分布或对数正态分布。因此在运用此种方法之前，必须先检验分析数据是否符合正态分布或对数正态分布。如果符合，可以用正常的程序进行处理，如果不符合须对原始的数据按照一定的规则进行剔除后才能用正常的程序进行处理。

### 3.2.1 数据的预处理

#### 3.2.1.1 数据的检验

运用概率统计法求背景值和异常界限时是以元素含量（或其它地球化学指标）在所研究的地质体中呈正态分布为基础的，所以在运用这种方法时首先必须对所研究的地质体中元素含量的概率分布型式进行检验。常用的方法有偏度、峰度检验法和概率格纸检验法。本文只对常用的偏度、峰度检验法作以介绍。

我们知道概率密度函数为：

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-1)$$

对数正态分布的概率密度函数为：

$$f(\lg x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\lg x - \lg \bar{x})^2}{2\sigma^2(\lg x)}} \quad (3-2)$$

检验的实质是考察经验频率密度曲线对于理论曲线偏离程度是否超出了允许限度。经验频率曲线不能偏斜太多，也不能陡太缓。常常用二个统计量来检验，一个是偏度  $\gamma_1$ （描述曲线的偏斜程度）；一个是峰度  $\gamma_2$ （描述曲线的陡缓程度）。计算公式如下：

当数据不分组时：

$$\text{偏度 } \gamma_1 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \quad (3-3)$$

$$\text{峰度 } \gamma_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3 \quad (3-4)$$

$$\text{标准离差 } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-5)$$

式中：  $x_i$ ——第  $i$  个样品中  $x$  的值 ( $i=1, 2, \dots, N$ )；

$\bar{x}$ —— $x$  的算术平均值。

$N$ ——子样的数目。

$$\text{当数据分组时，偏度 } \gamma_1 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^* (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$$

$$\text{峰度 } \gamma_2 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^* (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$

$$\text{标准离差 } \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i^* (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{偏度 } \gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3}$$

$$\text{峰度 } \gamma_2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - 3$$



$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n f_i^* (x_i - \bar{x})^2}$$

以上式中  $x_i$  ——第  $i$  组中值 ( $i=1, 2, \dots, N$ );

$\bar{x}$  ——  $x$  的算术平均值。

$N$  ——子样的数目。

$f_i^*$  ——第  $i$  组的频数,

$n$  ——分组数;

$f_i$  ——第  $i$  组的频率。

概率统计理论已经证明, 当母体服从正态分布时, 若子样较大 ( $N > 100$ ), 则统计量偏度、峰度均近似服从如下正态分布:

$$\gamma_1 \sim N(0, \sqrt{\frac{6}{N}}) \quad \gamma_2 \sim N(0, \sqrt{\frac{24}{N}})$$

因此, 若母体服从正态分布, 给定信度  $\alpha = 0.05$  时, 则  $\gamma_1$  的临界值不超过  $\pm 2\sqrt{\frac{6}{N}}$ ,

$\gamma_2$  的临界值不超过  $\pm 2\sqrt{\frac{24}{N}}$ 。

如果根据实测数据, 计算  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  的值都满足上述要求, 则说明数据在所研究的地质体中服从正态分布, 有一个不满足, 则说明数据不服从正态分布。

在检验对数正态分布时, 只需先将原始数据  $x_i$  转换为对数 (即  $\lg x_i$ ),  $x_i$  取对数组后的组中值,  $\bar{x}$  为对数平均值 ( $\lg \bar{x}$ ), 然后计算  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ , 其余检验步骤相同。

### 3.2.1.2 数据的剔除

按照《地球化学普查规范》要求, 地球化学背景值与异常的划分原则如下: 将原始数据转换为对数值, 反复用  $(\bar{x} + 2.5S)$  进行特高和特低含量值的剔除, 将剩余数据进行统计、计算。

常用以下方法进行剔除:

- 1) 用全部测试数据计算每个元素的平均值和均方差,
- 2) 用公式  $k = \bar{x} \pm 2.5S$  求出  $k$  值, 再对每个样品进行检查, 凡是大于  $k$  值的数据

均予以剔除 ( $K$  取负号时, 小于  $K$  值的剔除)。再进行计算看是否符合正态分布或对数正态分布。

### 3.2.2 原理及方法

在地质体中元素的正常含量是在一定的范围内变化的一系列数值, 是一组随机变量。根据数理统计的原理, 要描述一组随机变量, 最精确、严格的办法是求得它的概率分布函数, 即概率  $P$  与含量  $C$  的关系:

$$F(x) = P(c \leq x) = \int_{-\infty}^x f(c)dc \quad (3-6)$$

——式中的  $f(c)$  是概率密度函数,  $P(c \leq x)$  为含量小于等于给定  $x$  值的概率。

勘查地球化学家认为, 对于任何一个地质对象, 它们中的任何一种元素,  $F(x)$  都是存在的。把具有一个完整分布的地质对象叫做一个总体或者母体。但是对于一个总体存在的  $f(c)$  的形式, 却有很多不同的争论。

统计学理论已经证明, 对于任意一个随机变量  $x$ , 只要他们的各次观察值之间的差别是由无数因素所引起的, 而这些因素中没有一个是突出的, 则它的概率分布自然地趋向正态分布。其密度函数可以表示为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3-7)$$

我们在整理数据时, 从原始分析结果中把含量分成若干间隔, 然后统计落在各个间隔内的样品数 (或称之为频数), 再除以样品总数, 求出频率, 以频率对间隔作图, 可以得到频率直方图, 各频率顶点的连线便是该批数据的经验分布曲线。

在我们实际工作中, 母体的数学期望  $\mu$  和方差  $\sigma$  是难以求出的, 我们只能用有限的数据经统计求出:

$$\mu \approx \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \sigma \approx S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3-8)$$

只有当样本数  $n$  趋向于无穷大时, 两者才能相等。其中, 样本方差  $S$  是方差  $\sigma$  的无偏估计。

根据许多地球化学资料, 常量元素的分析结果比较接近正态分布, 而微量元素的直方图往往向高含量方向延伸, 形成正向不对称性。后人的进一步研究发现, 将原始数据转换成对数后再作图, 大多数微量元素的直方图的对称性大大地改善了。因此, 许多学者 (以阿伦斯为代表) 认为微量元素服从对数正态分布, 其密度分布函数和概率分布函数为:

$$f(\lg x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\lg x - \bar{\lg x})^2}{2\sigma^2}} \quad F(\lg x) = \int_{-\infty}^{\lg x} f(\lg t) d \lg t \quad (3-9)$$

在目前的生产及研究中,大量的地球化学数据处理都是基于对数正态分布这一基础来进行的。

经典的地球化学找矿理论以岩石、土壤、水系沉积物测量作为找矿手段。地壳中化学元素的含量在空间分布上构成了三维空间中的一个曲面,称之为地球化学面(geochemical surface)。

自 20 世纪 50 年代以后,地球化学家基本认为地球化学面的这种变化服从元素在地球化学场中的分布,即正态分布或对数正态分布。因此,常用地球化学异常参数的确定方法是统计勘查地球化学数据,判断数据的分布形式。常用的方法主要有:正态概率格纸检验法,偏度、峰度检验法等。对于符合正态分布的数据,其背景值和异常下限常按以下公式算出:

$$C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad C_A = C_0 + 1 \sim 3S \quad S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

上式中  $C_0$  为背景值,  $C_A$  为异常下限,  $S$  为样本方差。

若数据服从对数正态分布,将上式中  $x$  换成  $\lg x$  计算便可,最后再将  $\lg C_0$ 、 $\lg C_A$  换算成真数即可。

经过检验,如果化探数据不服从正态分布或对数正态分布时,首先将数据转换为对数值,然后采用  $(\bar{x} \pm 2 \sim 3S)$  进行特高及特低含量剔除,重新计算,直到没有特高和特低含量为止。

剔除后的数据被认为主要是背景含量,可以直接用这些数据算出背景值和异常下限。

### 3.3 数据滤波原理及方法

#### 3.3.1 处理原理

数据滤波是近年来在化探数据处理中应用比较广泛的一种方法。

此种方法是基于如下一种认识:任一点的趋势分量可以从该点周围一定范围内的其它各点的含量及其分布特点计算求得。这个参加计算的范围叫作“窗口”,选用不同的窗口,就可以实现数据的分解。被求得的点上可以有原始数据,也可没有原始数据,这样,不论数据分布规则与否,只要被求的点是按坐标格子拟定的,就可以自然地把数据

网格化了。

数据滤波的标准做法是在原始数据图上, 想象地设置一个窗口, 把落在该窗口内的原始数据按照一定的数学模型求出一个理论值作为窗口中心的趋势值。然后把窗口移动一格, 求下一点的值, 如此逐行地计算直到全区覆盖为止, 就得到网格化的数据点图。窗口的形状可以是正方形的也可以是长方形的或者是线型的, 形式及窗口大小视工作目的而定。

通常认为, 大窗口指示区域的概率比较大, 而小窗口更偏重突出一些局部异常。求窗口的趋势值时, 如果选用不同的滤波器, 如低通滤波、高通滤波、非线性滤波等, 就可提取出不同意义的趋势分量。

在用此种方法处理化探数据时, 其基本的思路是把地球化学背景面看成是一个连续起伏变化的曲面, 不同子区采用不同的异常下限, 一般用窗口代子区, 以小窗口代局部异常或噪音, 以大窗口为局部背景来拟合地球化学背景的变化趋势, 用衬值来圈定异常。在目前的化探数据处理中, 最常用的手段是利用衬值滤波技术来解决数据的光滑以及提高数据的可靠性等问题。衬值滤波是数字滤波技术的一种, 用它来识别化探异常, 特别是弱小异常则更为有效。

### 3.3.2 处理步骤

1) 将原始数据网格化。目的使稀密不均的情况达到规格化(多在 Surfer 中进行)。

2) 移动窗口大小的选择。窗口大小应根据要处理数据的目的而定。确定窗口大小要考虑到地质条件的复杂程度和所要研究的地质单元的大小(常常在  $4\text{cm}^2$  到  $36\text{cm}^2$  之间)。小窗口可以有效的抑制原始数据的“噪音”(常常指分析与采样误差), 使数据分布连续可靠, 而且能最大限度的保留局部地球化学特征。大窗口移动平均结果主要受区域影响, 显示区域的变化。

3) 移动平均值的计算和窗口移动距离的选取可以采用如下二种方法: 即等权与加权二种。

等权平均是将落入移动窗口内所有数据累加的总和除以数据的个数, 即:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

加权平均是将落入移动窗口内所有的数据与其权乘积的总和, 除以这些数据权的总和, 其表达式为:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$$

式中  $\omega_i$  在距离加权中, 表示数据点位与中心点位间距离的倒数  $c$  或从距中心点越远影响越小这一考虑出发, 经验地给予权值; 在面积加权中不用考虑距离, 而  $\omega_i$  表示各数据所能代表的面积。

原始数据经规格化处理, 使最小单元面积中只有一个数, 这就可以采用面积加权 ( $\omega_i = c = 1$ ), 则:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

窗口上下左右每次移动距离, 欲使移动平均结果和初始数据一样多, 那么每次移动距离就可规定为窗口边长之倒数 ( $1/2, 1/4, \dots$ ); 欲使数据减至一半, 就应规定移动距离为窗口边长倒数之 2 倍 ( $2/3, 2/4, \dots$ ); 以此类推。

#### 4) 移动平均数据的背景和异常划分方法:

① 用小窗口移动平均结果, 以正态假设为基础, 运用常规的统计方法求出背景值。

② 在原始数据量比较小时, 可以利用原始数据与大窗口移动平均结果之差 (剩余) 值作为异常值, 把大窗口移动平均结果作为背景, 但是一般采用大窗口移动平均值 ( $\bar{x}_{bi}$ ) 加一倍标准方差 ( $S_x$ ) 作为异常。

其中

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}_i)^2}{n-1}}$$

③ 小窗口移动平均结果 ( $\bar{x}_{ai}$ ) 减去大窗口移动平均结果 ( $\bar{x}_{bi}$ ) 之差 ( $A_i$ ), 即:

$$A_i = \bar{x}_{ai} - \bar{x}_{bi}, \text{ 其正值为异常。}$$

#### 5) 异常的评价

运用此种方法引用系数  $K$ 。  $K$  值越大异常越明显。

$$K = S \times \left( \frac{1}{a} \times \bar{A} + \frac{1}{b} \times \bar{B} \right)$$

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_{ai} - \bar{x}_{bi})}{n} \quad \bar{B} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{x}_{bi}}{n}$$

式中:  $S$ ——异常区总面积;

$a$ ——小窗口面积;

$b$ ——大窗口面积;

$\bar{A}$ ——小窗口异常平均值;

$\bar{B}$ ——大窗口结果平均值。

## 4 分形理论和方法在地质学中应用简述

分形几何学 (Fractal geometry) 是非线性科学的重要内容之一, 它是由法国数学家 Mandelbrot (曼德尔布罗特) 于 20 世纪 80 年代初创立的一门新的几何学, 它为研究自然界的不规则形状和复杂过程提供了新的定量方法。分形的基本特征是自相似性或标度不变性, 它可以用维数这一特征量来描述。自相似性或标度不变性也是地学中的一个普遍现象, 因而分形理论在地质科学具有广阔的应用前景。

### 4.1 分形理论简述

所谓“分形”的定义, 其原意是“不规则的, 分散的, 支离破碎的”, 又可称为“碎形”。分形一词是从拉丁文 Fractus 转化而来的, 有关它的定义很多, 这里只介绍几个常用的定义。

**定义 1:** 如果一个集合在欧氏空间中的豪斯道夫维数  $D_h$  恒大于其拓扑维数  $D_t$ , 即  $D_h > D_t$ , 则称该集合为分形集, 简称为分形。( $D_h \geq D$ ), 这个定义是由 Mandelbrot (曼德尔布罗特) 在 1982 年提出来的。

**定义 2:** 部分以某种方式与整体相似的形状叫做分形。

**定义 3:** 分形集合是这样的集合, 即它比常用几何学研究的所有集合还要更加不规则, 无论是放大还是缩小, 甚至进一步缩小, 这种集合的不规则性仍是明显的。

定义 1 是严格的数学定义, 相比定义 1, 定义 2、3 不是十分严格, 但是也刻划了分形的基本性质, 并且在物理上更易于被理解。

分形理论是研究自然和社会中广泛存在的零碎、复杂、无序、具有自相似性、自仿性和标度不变性的复杂系统, 以及隐藏在这些复杂系统和现象中的、具有精细结构、内在随机性、局部与整体本质联系的、被常用线性科学 (物理、欧氏几何) 排挤在外的不规则的、从有限认识无限的特殊规律的科学。它揭示的是组成部分 (局部) 以某种方式 (结构、信息、功能等广义分形) 与整体相似的形体、事物或现象, 或在多个层次上, 适当地放大或缩小其几何尺寸, 其局部与整体的整个精细结构, 形态, 性质等不因此而发生改变 (统计) 的形体、体系。

分形具有如下几个基本性质:

(1) 统计自相似性是指事物的局部 (或部分) 与整体在形态、结构、信息和时间等方面具有统计意义上的相似性。适当放大或缩小分形对象的几何尺寸, 整个结构并不改变。

(2) 自然现象仅在一定的尺寸范围内才表现出统计自相似性, 在这样的尺度之外,

不再具有分形特征。或者说，在不同尺寸范围或不同层次上具有不同的分形特征。

(3) 在欧氏几何学中，维数只能是整数，但是在分形几何中维数可以是整数或分数。

(4) 自然界中分形多是具有自相似性分布的随机现象，因而必须用统计的方法进行分析和处理。

在分形中还有两个重要的概念，第一，标度不变性，就是不含特征尺度，是跨尺度的对称性，也可以称之为自相似性，是指无论测量的单位或观察的尺度如何改变，所观察和研究的对象的性质（如形态、结构、复杂程度和不规则性等）均不发生改变，或者换言之，在各种标度下，物体看起来都是一样的。例如一块手标本上的微细矿脉与一条数百米长的大矿脉在形态上是很相似的；几个超大型斑岩铜矿床与一个小型斑岩型铜矿床它们形成的物理化学条件（如温度、压力等性质）也是相似的。标度不变性对分形来说是一种普遍适用的定律，它反映了分形的基本属性。分形的标度不变性也称标度律，或伸缩对称性。标度不变性存在的范围称为无标度区间。

地质现象中的标度不变性或自相似性特征十分的普遍。如褶皱和断裂的形态、火山（岩浆）喷发（侵入）旋回、地震、矿床和矿体的形态与分布，以及岩石中微量元素储量和矿石的品位分布等。从更广阔的范围来看，从原子结构、矿物结构、矿床结构、岩石结构、岩石圈板块结构，以至于地球的圈层结构、宇宙的星系结构，无论是微观的原子还是宏观的宇宙无不存在某种程度的自相似性。

地质现象的标度不变性或自相似性往往不是绝对相同，而是统计意义上的相似。相似的存在于一定的标度（尺寸）范围内的，即其上限和下限，而超出此区间则不具有自相似性，此外不同的可能有不同的分维数数值，也就是说自相似性具有的局部特征，即多重分形，也称为多标度分形，如水系沉积物中元素含量的空间分布以及矿床的空间分布等，就往往可能具有多重分形的特征。

第二重要的概念是分维。维数是刻画图形占据空间规模和整体复杂性的量度，是图形最基本的不变量，在欧氏空间中，点是 0 维，线是 1 维，面是 2 维，体是 3 维。而且在欧氏几何中，维数都是整数，而在分形理论中，扩展了维数的概念，它可以是分数，称为分维数，分维数包含了整数维，但是其内涵远大于整数维数，它是描述了一个分形的基本的特征量，通常用大写字母  $D$  来表示。在能检索到的文献中，介绍最多的是规则分形康托集合（Cantor set），它是由德国数学家格奥尔格·康托在 1874 年提出的。下面作以简单介绍。

取一单位长度的线段（如下图所示），将其分为三等分， $r_1=1/3$ ，舍去中间的一段，保留两侧的两段， $N_1=2$ ；将保留的两段再各三等分， $r_2=1/9$ ，又舍去中间的一段， $N_2=4$ ；如此操作，不断的分割下去，最终会形成一个点集，这样的点集称为康托集合。



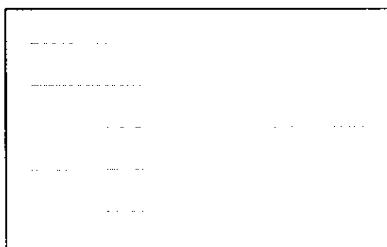


图 4-1 康托集合示意图

三分康托集合的构造过程，每次去掉的这黑线中间的三分之一，这个图表示出头五个阶段。

为确定康托集的分维数  $D$ ，可将式  $N(r) \propto r^{-D}$  改写成下式：

$$D = \frac{\ln\left(\frac{N_{n+1}}{N_n}\right)}{\ln\left(\frac{r_n}{r_{n+1}}\right)} \quad (4-1)$$

对康托集由上式有  $\frac{N_2}{N_1} = 2$ ， $\frac{r_2}{r_1} = 3$ ，于是有  $D \approx 0.6309$ 。由康托集的构造的过程，

可以把康托集的若干性质概括如下：

- a) 自相似性。康托集包含许许多多按不同相似比与自身相似的子集（局部）。
- b) 精细结构。康托集包含有任意小比例的细节，其图形越放大，间隙就越清晰的展现出来。
- c) 康托集是一个点集。其每一点附近都有大量被各种不同间隔分开的其它点存在。
- d) 康托集的极限情况是一个由无数点组成的无穷集合，但是总长度为零。

除了康托集合以外，数学上的规则分形还有科契尔曲线、谢尔宾斯垫片等等。

分形的提出对科学认识与方法论而言具有广泛而深远的意义，它揭示了整体与部分之间的内在联系，找到了从部分过渡到整体的媒介与桥梁，说明了部分与整体之间的信息；为描述非线性复杂系统提供了简洁有力的几何语言，使人们的传统思维方法由线性进展到非线性，并同系统论一起，共同揭示了整体与部分之间多层面、多视角的联系方式。分形理论从一个新层面深化和丰富了整体与部分的辩证关系，为人们认识世界提供了一种新的方法论；为人们从部分中认识整体，从有限认识无限提供了可能的依据。分形理论表明，从简单迭代过程可以得到复杂的现象，因此，它为我们认识复杂的世界提

供了一种崭新的思路。

## 4.2 分维的计算方法

由于研究的具体对象（分形）不同，其分维数计算具体形式也不同，最常见的分形维数有相似维（similarity dimension）或容量维（capacity dimension） $D_0$ ，信息维（information dimension） $D_1$ ，关联维（correlation dimension） $D_2$ ，和广义维（generalized dimension） $D_q$ 。

### 4.2.1 相似维(similarity dimension)或容量维(capacity dimension) $D_0$

在测量地质体边界的长度时，设测量尺度为  $r$ ，覆盖整个边界的最少次数为  $N(r)$ ，此时将容量维数定义为：

$$D_0 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln N(r)}{\ln(1/r)} \quad (4-2)$$

将这一定义推广到  $n$  维空间  $E_n$  ( $E_n$  为  $n$  维 Euclid 空间) 中，上式中的  $r$  为覆盖  $E_n$  中图形所需的立方体的边长或球体的直径， $N(r)$  为所需的立方体或球体的最小数目，可以证明  $D_0 = D_f$  (豪斯道夫维数)

### 4.2.2 信息维 (information dimension) $D_1$

容量维  $D_0$  只考虑了覆盖图形所需的立方体或球体的数目与其边长或直径的关系。对于那些非确定性的事物，一般是用概率的形式表示出来的，为此引入信息维数的定义：

$$D_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sum \frac{P_i \ln P_i}{\ln(r)} \quad (4-3)$$

其中  $P_i$  是覆盖概率，当用边长为  $r$  的小盒子去覆盖分形结构时， $P_i$  是分形结构中某些点落入小盒子的概率。如果  $P_i = \frac{1}{N(r)}$  时，则有  $D_1 = D_0$ 。

### 4.2.3 关联维 (correlation dimension) $D_2$

P.Grassberger 和 J.Procaccis (1983) 应用关联函数  $C(r)$  给出了关联维数定义：

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{C(r)}{\ln(r)} \quad (4-4)$$

式中  $C(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j} H(r - |x_i - x_j|)$  是相空间中两点之间距离小于  $r$  的概率， $|x_i - x_j|$  为

两点距离间的向量距离， $r$  为指定的距离上限， $H(z)$  是 Heaviside 函数。

4.2.4 广义维 (generalized dimension)  $D_q$ 

$$D_q = \lim \left( \lim_{q_i} \left( \frac{1}{q_i} - 1 \right) \ln \sum_i \frac{P_i^{q_i}}{\ln r} \right) \quad q = -\infty, \dots, -1, 0, 1, +\infty \quad (4-5)$$

式中  $P_i$  是覆盖率, 当用边长为  $r$  的盒子去覆盖分形结构时,  $p_i$  是分形结构中某些点落入小盒子的概率, 当  $q$  取不同值时,  $D_q$  表示不同分维, 如  $D_{q=0}=D_0$ ,  $D_{q=1}=D_1$ ,  $D_{q=2}=D_2$ 。应当注意的是上述分维数之间的关系只是形式上 (或定义上的), 但是在实际的计算中, 还是要按  $D$  的类型分别计算。

## 4.2.5 分数布朗函数

分数布朗 (也称分形布朗运动 FBM) 是 B.B.Mandelbrot 及 Van Ness 于 1968 年提出的, 用于模拟各种具有分形特征的噪声, 现已成为描述自然界分形的典型数学模型。由于分数布朗运动  $B(t)$  起初只是时间  $t$  的函数, 而地球科学中的分形更多地要求从空间上来研究, 因而要把分数布朗运动的函数中的时间自变量  $t$  换成空间自变量  $x$  (可以是一维、二维或是三维), 这样,  $B(x)$  就是我们所需要的数学模型, 亦就是地质统计学中区域化变量  $Z(x)$ 。

布朗运动的条件为: (1) 具有独立增量; (2) 增量是平稳的; (3) 具有有限方差。对于分数布朗运动, 可以放宽一些条件, 常见的是要求增量服从正态分布, 但不再是相互独立的, 或者分数布朗运动的增量是平稳的, 但不能满足方差有限这一条件。指数  $H$  ( $0 < H < 1$ ) 的一维分数布朗运动  $B(x)$  是定义在某概率空间上的一个随机过程:  $[0, +\infty) \rightarrow R$ , 它满足两个条件:

(1) 概率为 1,  $B(x)$  连续, 且  $B(0) = 0$ ;

(2) 对任意  $x \geq 0$ ,  $h > 0$ , 增量  $[B(x+h) - B(x)] \sim N(0, h^{2H})$ ,  $0 < H < 1$ ,  $h$  为样品点对的间距。由此定义可知, 增量也是平稳的, 因为它具有依赖于  $x$  的概率分布, 同时还有:

$$E[B(x+h) - B(x)] = 0;$$

$$E[B(x+h) - B(x)]^2 = h^{2H} \quad 0 < H < 1;$$

成立, 换言之,  $E[B(x+h) - B(x)]$  的概率密度服从均值为 0, 方差为  $h^{2H}$  的正态分布。用地质统计学的语言来说, 就相当于  $B(x)$  是个满足本征 (或内蕴) 假设的区域变量, 其变差函数存在且平稳, 还必须是幂函数型, 即有:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[B(x+h)]^2 \propto h^{2H}$$

若  $h$  以比例  $K$  放大成为  $Kh$ ,  $\gamma(h)$  则以比例  $K^H$  放大  $K^H \cdot \gamma(h)$ 。

研究表明, 分数布朗运动的指数  $H$  与其分维  $D$  有着密切的关系, 因为分数布朗运动所形成的分形体是一种自仿射分形, 可以证明, 对于一维分数布朗运动的样本函数的图形(分数布朗运动曲线),  $D=2-H$ 。于是, 只要能利用变差函数的方法求出  $H$ ,  $\gamma(h) \propto h^{2H}$ , 因而用分形布朗运动与地质统计学中的幂函数型变差函数作模型, 便有可能从地球化学数据中提取出分维  $D$  值。

### 4.3 分形理论在地球科学中的应用及其研究现状

在地球系统中, 许多地质现象的空间展布具有分形结构, 从微观的球晶生长, 到宏观的海岸线, 地形的等高线, 云团的形态, 渗流, 扩散等空间结构都呈自然的分维数状态。

80 年代末, 分形理论开始引入地质学研究中。Turcotte(1986、1989)对矿石品位和矿床累计储量的研究表明, 二者之间存在幂函数关系, 即分形结构, 在给出有经济价值矿物形成模型的基础上, 建立了矿石平均品位和累计储量的分形关系模型。秦长兴(1989)对华南金属矿产储量和品位的分形模型研究指出了分形模型的理论意义及其在矿产资源预测评价中的作用。分形理论的创始人 Mandelbrot 对铜矿的研究认为, 高品位铜矿可看作是由低分维相似性分形集合“集中”或“支持”的, 品位较低的铜矿, 可视为受到一维分形集合的支持, 从而得出铜矿的分布存在多重分形。秦和兴等(1992)认为金属矿床的空间位置、矿化的空间分布、矿田构造形迹(矿脉)具有自相似性。沈步明等(1993)、程小久等(1994)认为矿石品位的分维数  $D$  值可以确定矿化类型, 确定勘探网度和矿床经济评价的参数。孟宪国等(1991)的研究表明, 地质数据中广泛存在分形结构; 认为分维和多标度分形谱是表示分形结构复杂性的定量指标, 对研究地质结构的异常特征有特殊意义, 在云南腾冲地区地质异常及矿产预测研究中将熵、变差函数与分形相结合, 取得了很好的效果; 同时也提出, 在矿产预测数学模型中, 通过分维和多标度分形谱, 建立相似一类比的分形模型。施俊法、王春宁(1998)研究了中国金矿床分形分布及其对超大型矿床的勘探意义, 成秋明(2000)探讨了多维分形理论和地球化学元素分布规律, 申维(1997)给出了成矿预测中分形模型分维数估计的新方法, 龚庆杰(2001)提出了一种确定地球化学异常下限的简便方法, 诸如此类的研究, 分形理论正日益渗透到成矿规律与成矿预测、矿床勘查与评价中。

### 4.4 分形理论和方法在地球化学勘查领域的研究和应用

近年来, 有勘查地球化学家开始把分形的理论和方法应用于勘查地球化学。

#### 4.4.1 矿床空间分布的分形性质

矿床在空间上的分布在各种区域的尺度内都是不均匀的, 具有聚群形式的分布。研

究点群在空间上分布的分形模型通常有两种方法，一种是数盒子法（box counting），即将研究的区域划分成边长为  $r$  的正方形格子，统计含有一个或多个矿床的格子数，不断改变  $r$ ，即可求得与  $r_i$  相对应的一系列的格子数（ $N_i$ ）， $N_i$  将随  $r$  的增大而减少，当  $r_i$  和  $N_i$  存在指数关系时，可求出其分维值（ $D_b$ ）。

另一种方法是聚群密度测定法（cluster density determination），即用不同半径（ $r$ ）在研究区域内划圆圈，统计在圈内的矿床数，可得到  $r_i$  与  $N_i$  的关系，求得其分维值（ $D_c$ ），也有人将其翻译为数圆圈法，一般认为第一种方法更敏感，较为常用。

我们来看下表：

不同地区矿床空间分布的分维值

表 4-1

矿 床	分维值		无标度区间		资料来源
	D1	D2	$\delta 1$	$\delta 2$	
中国金矿	0.2993	1.3073	20~150	150~5000	施俊法
浙江金矿	0.1923	0.7108	1~20	20~750	李长江等
浙江银矿（39）	0.1405	1.1676			
浙江铅锌矿（56）	0.1459	1.1723			
浙江萤石矿（176）	0.3778	1.1851			
美国贵金属（4775）	0.5048	1.1509	1~15	15~1000	carlson
津巴布韦矿床（122）	0.32	1.12	0.3~2.5	2.5~29	Bleenkins cp
津巴布韦矿床（122）	0.28	1.18			

注：括号内的数字表示矿床数

微细浸染型金矿分形研究结果

表 4-2

研究区域	分维值	回归线相关系数 R2	无标度区间/km
川西北	1.54	0.993	72.7~145.3
滇黔桂	1.26	0.997	31.8~145.3
中 国	1.23	0.995	18.9~66.1
西秦南亚带	0.98	0.983	23.9~107.5
美国卡林成矿带	0.77	0.999	2.2~29.3

表 4-1 是近年来不同作者用数盒子法对不同地区矿床分布研究的结果。表 4-2 是对微细浸染型金矿分布进行分形研究的结果。尽管研究的范围不同、地区不同、矿种不同，但都同样反映了一个基本事实，即矿床的空间分布在一定的尺度范围内具有自相似的分

形性质。

上述结果有两种情况：一种情况是在大范围内研究一个矿种的分布，分成两个不同的无标度区；每个无标度区内，矿床的分布具有不同的分形结构，另一种情况是在一个大范围内矿床的分布只有一个无标度区。Agterberg 等研究加拿大 Abitibi 火山岩带在  $8.96 \times 104 \text{ km}^2$  范围内 1306 个金矿床的分布时，确定其分布具有分形结构，其分维值为  $D_c=1.54$ （聚群密度测定法），然后在这个大范围内，取一个小的区域（ $4185 \text{ km}^2$ ，含有 295 个矿床）接着再把这个小区域分成两个面积相等的区域，一个含有 222 个矿，另一个含有 73 个矿，结果在各个层次上都具有一个无标度区，而且都有相似的分形结构和相近的分维值。

矿床在空间上的分布受地质背景和成矿机制的制约，Carlson 认为在热液系统中，若干循环单元活动于具有分形结构的裂隙系统中，这些单元又由若干更小的单元组成，依次构成了不同等级的循环单元，矿床形成于某些等级的循环单元内，从而构成了分形系统，并出现了两个无标度区，热液和裂隙系统在 1~15km 无标度区表现出来，而 15~1000km 范围是侵入体的分形聚集的结果，Blenkinsop 把他对津巴布韦金矿分布研究获得的两个无标度区都归因于破碎带内分形热液系统内矿化的结果。

#### 4.4.2 在地球化学中的分形研究

在矿床地球化学中，早在 20 世纪 60 年代就由 Dewijs 提出了矿床富集的分形模型。后经多次改进，Agterberg 提出了矿床的分形模型；Cheng（1994, 1996）通过分形及多重分形方法，将地球化学异常从背景中分离出来；Allegre 等（1995）总结了标度律与地球化学分布之间的关系；於崇文等运用非线性理论研究了成矿作用非线性动力学过程，并提出了地球化学的时-空分形结构的观点，并根据复杂性理论提出了“成矿作用的复杂性与自组织临界性”的论断，认为成矿作用处在“混沌边缘”，提出应将成矿作用从一般意义上的非线性研究，上升到复杂性理论的高度来研究。

孟宪国、赵鹏大（1993）认为，在地质数据中广泛存在分形结构。成秋明（2002）等将分形方法用于划分地球化学异常与背景，并利用多重分形进行研究，李长江、孟宪国、李才伟、申维、龚庆杰、谢淑云等都从不同角度以分形模型为基础，建立了地球化学数据空间插值的分形方法，并且显示出应用前景与潜力。

综上所述，分形理论在地球科学中的应用可以概括为以下几个方面：（1）对地质体或某些地质现象的结构进行分析，求其相应的分维，寻求分维值与有关变量之间的关系，探讨分形结构的形成机理。（2）对地质作用过程进行分形分析，从而预测演化的结果。例如，大地震前小震变化分形分布研究，对于大震的预报有一定的意义。（3）分形理论与地质统计学相结合，利用分形模型对地质数据进行空间插值。（4）地球化学中利用分形模型进行快速确定元素的异常下限。经过多年研究，分形理论在地学中的应用取得了

大量的成果，属于当代地球科学前沿领域之一。它的发展趋势是：从单纯追求分形模型的应用，转向对模型的应用条件、模型地质地球化学意义研究；研制适用于地球化学数据的分维模型，进而将其用于解释常用理论无法解释的地质地球化学现象。应该指出，大多数的研究成果都是在一定局部范围内得出的，能否将得到的结论在较大范围内推广，还有待进一步研究。但是它作为一种新理论、新学说，为我们提供了一种新思路、新方法；它所揭示的一些规律，也与矿床的勘查、找矿和开采实际相吻合，与已知的地球化学规律相一致。

## 5 研究区地质特征

### 5.1 研究区大地构造位置等概述

#### 1) 自然地理概况:

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州若尔盖县,面积约  $41\text{km}^2$ 。

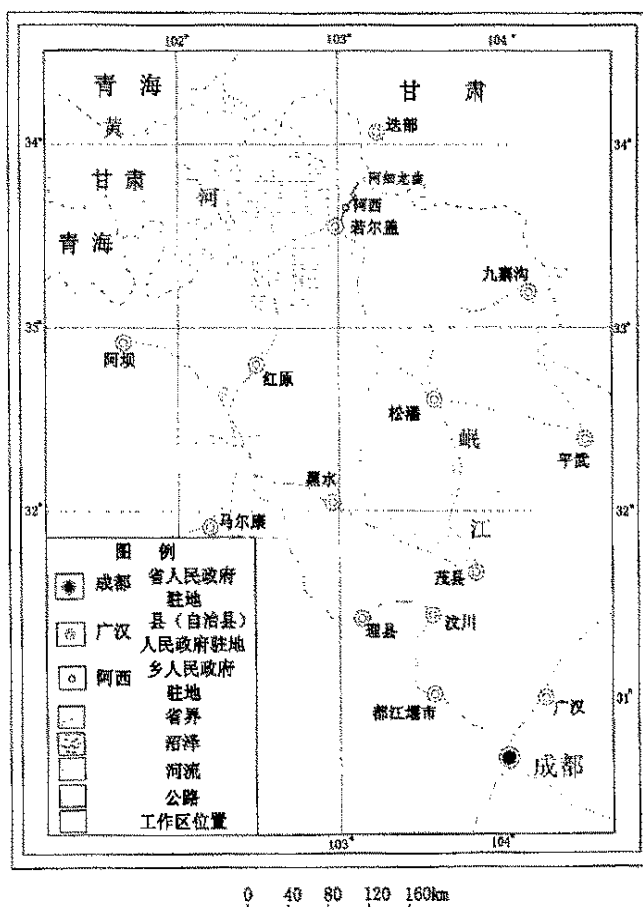


图 5-1 四川省若尔盖县阿细龙曲交通位置示意图

工作区为深切割中高山区,总体地势南北低中部高,中部数个高山沿 NW 向呈串珠状排列,工作区中部最高海拔  $3800\sim 4010\text{m}$ ,最低海拔位于测区东北角仅为  $3280\text{m}$ ,其最大相对高差约  $800\text{m}$ 。工作区内河流一级水系呈 NWW 或近 EW 向平行展布,二级水系呈近南北向,将工作区切割成长方形块体,北边水系经纳考曲河汇入嘉陵江,南边水系经黑河汇入黄河。河流流量受气候及天气影响大。

工作区内植被由南向北从草地、灌木丛过渡到以松、柏为主的原始森林。植被覆盖率极高,约  $95\%$ ,基岩露头小于  $5\%$ 。该地区气候寒冷,四季无夏,昼夜温差变化很大,



11月至翌年5月平均气温为-5.5℃，冰冻期在5~6月以上，野外工作的黄金时间为5~9月。

2) 大地构造位置:

研究区大地构造位置属松潘—甘孜地槽褶皱系（Ⅰ级）巴颜喀拉冒地槽褶皱带（Ⅱ级）阿尼玛卿地背斜（Ⅲ级）。普查区则处于地背斜中段的玛沁—略阳深大断裂与荷叶断裂之夹持地带（图 5-2 略图），北接秦岭地槽褶皱系，南靠松潘—甘孜地槽褶皱系（见附图 2 四川省若尔盖县阿西龙曲地区区域地质图），是成矿的有利地带。

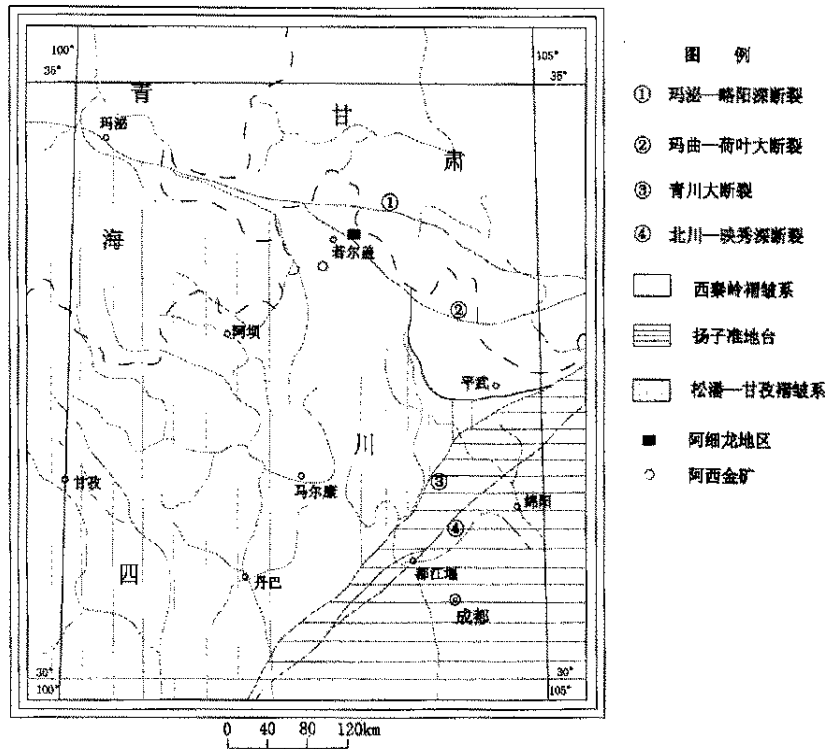


图 5-2 研究区大地构造位置图

5.2 区域地层特征

研究区地层从古生代—新生代均有不同程度的出露（详见附图 2 四川省若尔盖县阿西龙曲地区区域地质图）。

区域最老地层为志留系地层，见于图幅北部，构成白龙江复背斜主体，呈东西向展布，为浅海还原条件下类复理石建造，由黑色千枚岩、板岩、变质粉砂岩组成。在硅泥岩建造中，金元素明显富集，含金背景值  $3.11 \times 10^{-9}$ ，是降扎金矿的含矿层位。

泥盆系分布于白龙江复背两侧，由浅海相陆源碎屑岩、碳酸盐岩组成，是区域重要的含金层位，含金背景值为  $3.70 \times 10^{-9}$ 。

石炭系一二叠系分布于白龙江复背斜南侧，为浅海相碎屑岩、碳酸盐岩建造。

三叠系缺失下统，分布于玛曲断裂以南，出露最广，为一套浅变质江海相类复理石沉积及浊流沉积。含金背景值为  $1.7\sim 2.5\times 10^{-9}$ ，是重要的衍生矿源层及容矿层，也是最重要的含金层位，京格尔、团结、阿西、甲吉、喀嘎等金矿床（点），包括本次普查的阿细龙曲金矿均产于该层位中。

白垩系为断陷盆地—山间盆地冲洪积及湖相沉积，是氧化条件下形成的内陆碎屑岩建造，由一套砾岩及砂砾岩夹少量泥岩组成，构成所谓“红盆”，可形成砂金矿。

第四系由褐黄色砾、砂、粘土等组成，为残、坡、堆积物和冲积层，可形成砂金矿。

### 5.3 区域岩浆岩

区域岩浆活动严格受北西向的区域构造控制，与金矿成矿关系密切的岩浆岩主要有华力西中期的中酸性侵入岩，如降扎花岗闪长岩；印支晚期的中酸性火山岩—一次火山岩，规模较小，多呈岩株产出，次为各类岩脉，如阿西、喀嘎石英闪长岩。

#### 5.3.1 降扎花岗闪长岩

以岩株形式出露于图幅西北角，降扎西南约 2km 处。呈椭圆形，长轴为北西—南东向，长 1.7km，宽约 1km，侵入于中上志留统。岩体中心相为花岗闪长岩，灰色，花岗结构，局部为似斑状结构。岩体边部，石英含量减少、渐变为闪长岩。围岩蚀变带中可见红柱石、石榴石、电气石等变质矿物。据资料，岩体的黑云母钾氩年龄为 294.7Ma，时代属华力西中期。降扎金矿即产于该岩体接触蚀变带中。

#### 5.3.2 阿西石英闪长岩

出露于阿西乡南东，包括四条近于平行的岩脉，均侵入于中三叠统扎尕山群地层中，长轴北西—南东向。北东的一条位于达龙其卡西约 5km 处，长 6km，宽百余米，围岩蚀变强烈，交代变质作用明显，见硅化、褐铁矿化、碳酸盐化、辉锑矿化等，团结金矿直接产于该蚀变闪长岩体中。南西的三条位于且让，中间一条为主脉，脉宽 30~100m，长 3km 左右。它们在深部可能连为一体。围岩蚀变主要有砂卡岩化、硅化、碳酸盐化等，阿西金矿即产于距岩体 50~100m 的原岩蚀变带中。普查区也有北西向的石英闪长岩脉侵入，且金矿化显示明显。

#### 5.3.3 喀嘎石英闪长岩

以岩株形式出露于喀嘎。长 1.2km，宽 0.6km，为椭圆形。长轴方向  $310^{\circ}$  左右。侵入于中三叠统扎尕山群地层中。岩体属边缘带，粒度细，见围岩捕虏体。围岩受热力变质作用，发生角岩化，角岩具显微花岗鳞片变晶结构，斑点状构造，变质矿物主要为黑云母。喀嘎金矿即产于该岩体蚀变带中。

### 5.3.4 岩脉

出露于图幅北部,从超基性—基性—酸性岩脉均有产出,大多侵入于志留系地层中,常见有煌斑岩脉、花岗斑岩脉及石英脉等。

由此可见,岩浆活动导致的热事件引起矿源层中金元素活化、迁移,造成不同程度的富集,尤其岩浆期后的热液活动,对金的成矿作用更为重要,因此应重视本区的岩浆热液活动证据。

## 5.4 区域构造

测区玛曲—荷叶断裂北侧为西秦岭地槽褶皱系的降扎地背斜;而南侧为松潘—甘孜地槽褶皱系的阿尼玛卿地背斜。构造线主要呈北西向展布,局部地区构造线方向呈 NE 向。

### 5.4.1 褶皱构造—白龙江复背斜

位于图幅北部,区内仅分布其南翼,轴线总体呈北西向,为本区主要褶皱构造形迹。轴部出露的最老地层为前志留系浅变质的中酸性火山岩,两翼依次为志留系、泥盆系、石炭系、二叠系及三叠系组成。从整体来看,该复背斜的两翼较为完整对称,北翼岩层倾角较陡,为  $60\sim 70^\circ$ ,南翼岩层倾角相对平缓,为  $50\sim 60^\circ$ 。次级褶皱较发育且复杂,志留系在南翼的分布显得较北翼为宽。区域金矿床(点)均分布于白龙江复背斜南翼玛沁—略阳深大断裂和玛曲—荷叶大断裂夹持地带及其上下盘金成矿带上。

### 5.4.2 断裂构造

#### (1) 玛沁—略阳深大断裂带

这是一条区域性深大断裂带,为超壳断裂。是西秦岭造山带与松潘—甘孜造山带的分界断裂,断裂两侧,岩层变质程度完全不同,并具多期活动特点,岩浆活动、构造热液、地下含矿气水热液活动频繁,对金和多金属成矿有利。断裂带以近东西向穿过图幅北部,具剪切—挤压—扩张—剪切、挤压多期次活动特点。断裂带北侧,可见志留系硅质页岩建造、瓦克式建造在不同地段被逆冲推覆于南侧的三叠系的类复理石建造之上,且可见到滑塌型混杂岩建造。形成的主要时代主要为印支期。该断裂南侧北西向荷叶大断裂及其两者夹持地带的水神沟断裂、本多—拉来贝断裂带控制着数个大、中型金矿的分布,在夹持地带西北端为京格尔金矿床,南东端为水神沟金矿床,南端为巴西金矿床。普查区位于本多—拉来贝断裂带上。

#### (2) 玛曲—荷叶大断裂

穿过图幅中部,是普查区的主要断裂构造,它与玛曲—略阳深断裂带的夹持地带控制着数个大、中型金矿床的分布。在夹持地带西北端为京格尔金矿床,东南端为水神沟金矿床,普查区南侧为阿西金矿床。

## 5.5 金矿化特征

在若尔盖——九寨沟金资源富集区，已发现金矿产地数十处，该带经数十年地质勘察和研究，已初步查明产出一系列金矿床，如西以阿西金矿、东以天池金矿为典型特征的、包括团结金矿、洼欠沟金矿、磨房沟金矿、雄黄沟金矿、青龙沟金矿、木正沟金矿等（详见下页图 5-3），另有铜、锑、铁等金属矿产。在玛沁——略阳断裂带与玛曲——荷叶断裂带夹持带，西段为京格尔金矿床，北西段为阿细龙曲金矿，南东段为水神沟金矿床，这些金矿床（点）多属中低温热液成因（岩浆期后热液和地下热卤水），与富金层位、断裂构造、中酸性岩浆活动（中酸性岩株、岩脉）关系密切，热液蚀变如硅化、黄铁矿化、辉锑矿化、绢云母化、高岭石化、砂卡岩化明显，且常定位于金的矿致复合异常晕圈和构造结点与热隆（岩体或隐伏岩体）附近。

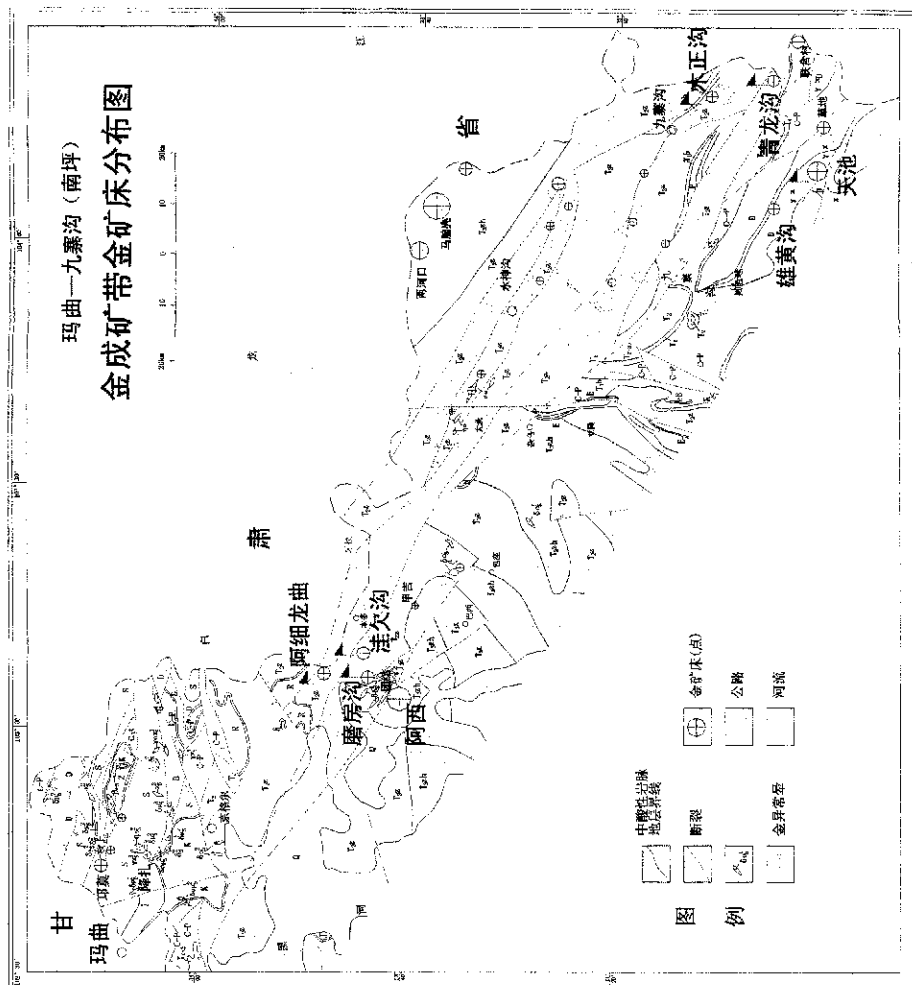


图 5-3 玛曲—九寨沟金成矿带矿床分布图

## 6 若尔盖阿细龙曲地区金地球化学异常数据处理

### 6.1 阿细龙曲地区金数字地质图编制

根据本人从四川省核工业地质调查研究院、四川省地质矿产勘查开发局、四川省物探化探队、川西北地质大队等单位收集的地质数据和资料,运用 MapGIS 技术方法处理,制成若尔盖阿细龙曲地区金矿数字地质图。

### 6.2 阿细龙曲地区金的地球化学数据库

#### 6.2.1 数据来源

本文引用金勘查地球化学原始数据来源于四川省核工业局地质调查研究院和四川省化探队。

#### 6.2.2 数据预处理

由于研究区的化探数据为原始分析数据,无关联坐标点,因此先用 MapGIS 进行处理,给每一取样点赋坐标值。

- (1) 给每一取样点加上地理坐标;
- (2) 将从不同单位收集的不同时期的资料、数据进行统一,以便于比较。

#### 6.2.3 单元素地球化学图的编制

参照《地球化学普查规范》(DZ/T0011-91)和《地球化学勘查图式图例及用色标准》(DZ/T0075-93),编制单元素地球化学图。

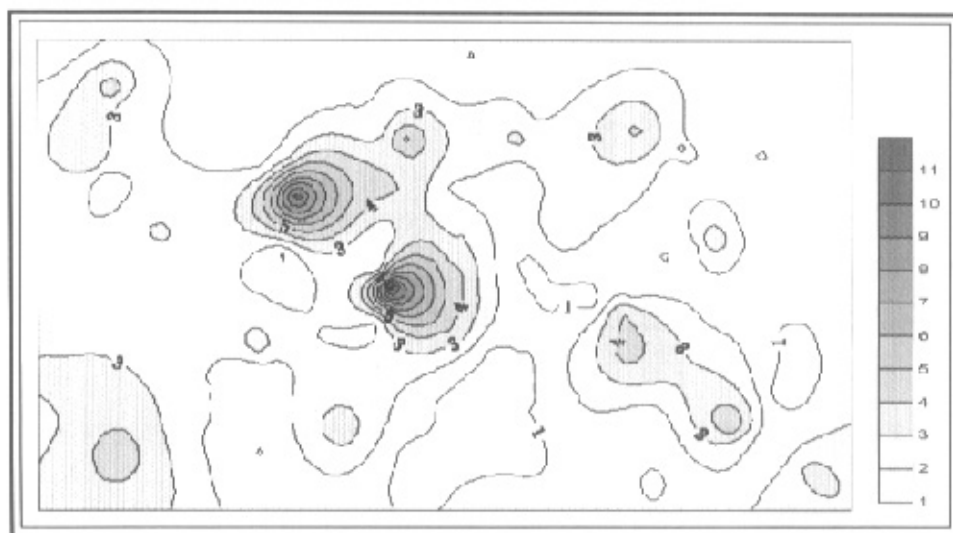


图 6-1 Au 元素等值线图

注：按照四川省核工业局地质调查研究院的明确规定，所绘成果图件如金元素等值线图等图件一律不得标注坐标、地名等能标识地理位置的要素，仅限于本文学术探讨使用。下同。

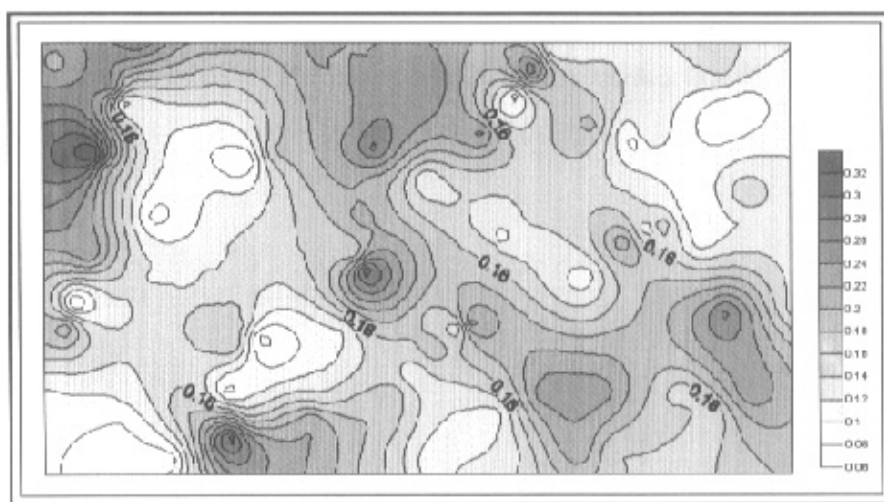


图 6-2 Ag 元素等值线图

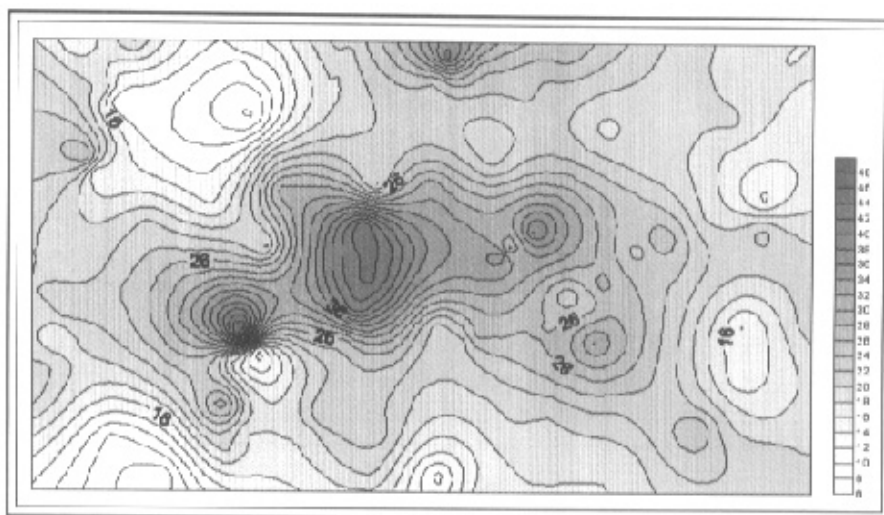


图 6-3 As 元素等值线图

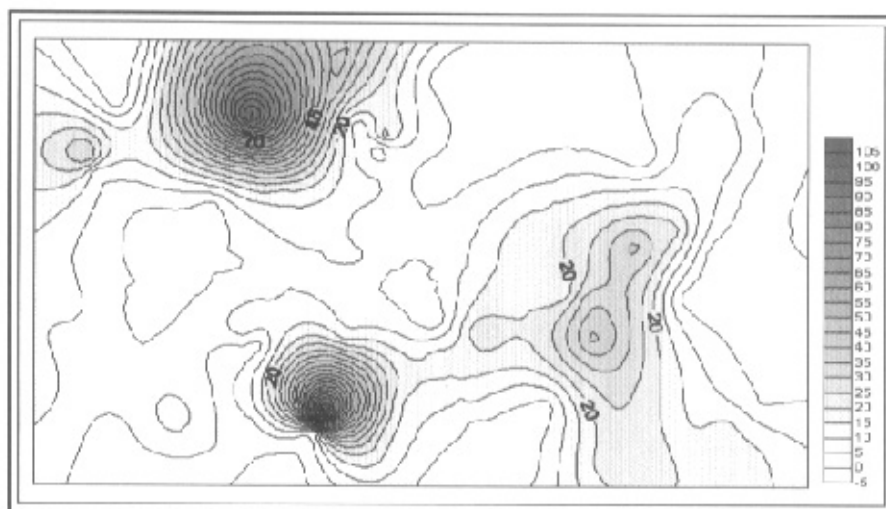


图 6-4 Sb 元素等值线图



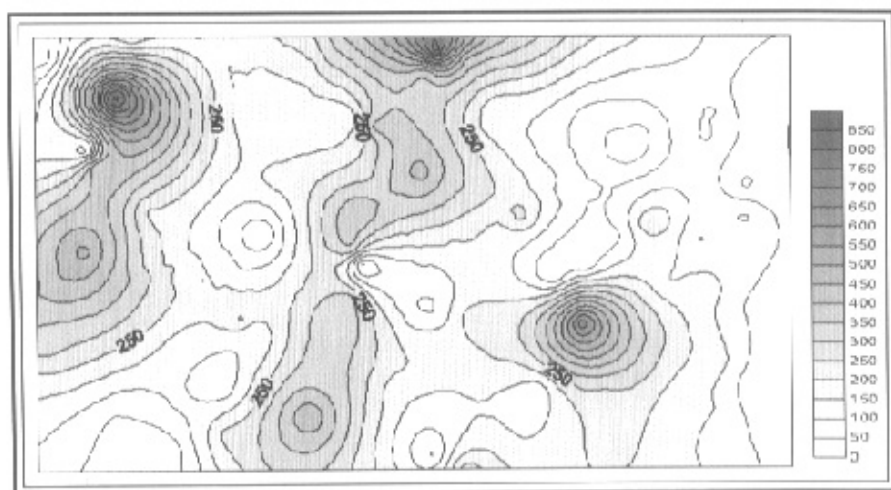


图 6-5 Hg 元素等值线图

## 7 若尔盖阿细龙曲地区金地球化学异常勾绘研究

### 7.1 区域金背景值和金异常下限的确定

本文采用不同理论和方法确定金背景值与异常下限，现分述如下：

#### 7.1.1 常用方法确定的背景值与异常下限

按照《地球化学普查规范》(DZ/T0011-91)的要求，地球化学背景值与异常的划分原则是：

(1) 将原始数据转换为对数值，反复用  $(\bar{x} \pm 2.5S)$  进行特高和特低含量剔除，将剩余数值进行统计。

$$(2) \quad C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \bar{x} \quad C_A = C_0 + 1.65S \quad S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中， $C_0$  为背景值的对数值， $C_A$  为异常下限的对数值。

在本次研究的过程中，对样品原始分析数据进行了统计分析，结果见下表（表 7-1）

水系沉积物样品分析数据检验表

表 7-1

元素名称	原始数据是否服从正态分布	取对数后是否服从正态分布	备 注
Au	不服从	不服从	
Ag	不服从	服从	
As	不服从	不服从	
Sb	不服从	服从	
Hg	不服从	不服从	

从上表可以看出，所有分析样品的原始分析数据均不服从正态分布，取对数后只有 Ag 和 Sb 服从正态分布，其作元素须按照规范要求进行进一步剔除后方能计算。剔除后计算结果如下表（表 7-2）：

样品分析数据统计值 表 7-2

统计参数	元 素 名 称				
	Au	Ag	As	Sb	Hg
样 品 数	97	99	87	99	96
算术平均值	$2.1 \times 10^{-9}$	$0.18 \times 10^{-6}$	$21.6 \times 10^{-6}$	$12.8 \times 10^{-6}$	$220 \times 10^{-9}$
最 大 值	$5.3 \times 10^{-9}$	$0.35 \times 10^{-6}$	$35.5 \times 10^{-6}$	$110 \times 10^{-6}$	$859 \times 10^{-9}$
最 小 值	$0.7 \times 10^{-9}$	$0.07 \times 10^{-6}$	$12.5 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-6}$	$29 \times 10^{-9}$
样本方差	0.238	0.157	0.085	0.472	0.091
变异系数	0.940	0.195	0.064	0.558	0.134
中 位 数	$1.8 \times 10^{-9}$	$0.16 \times 10^{-6}$	$21.2 \times 10^{-6}$	7.55	$187 \times 10^{-9}$
众 数	$1.3 \times 10^{-9}$	$0.12 \times 10^{-6}$	$22.4 \times 10^{-6}$	2.91	$153 \times 10^{-9}$
背 景 值	$2.0 \times 10^{-9}$	$0.15 \times 10^{-6}$	$20 \times 10^{-6}$	$4.0 \times 10^{-6}$	$250 \times 10^{-9}$
异常下限	$2.5 \times 10^{-9}$	$0.18 \times 10^{-6}$	$26 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-9}$

常用方法确定的元素异常参数如下表：

常用方法确定的异常参数 表 7-3

元素名称	背景值	异常下限	备注
Au	$2.0 \times 10^{-9}$	$2.5 \times 10^{-9}$	
Ag	$0.15 \times 10^{-6}$	$0.18 \times 10^{-6}$	
As	$20 \times 10^{-6}$	$26 \times 10^{-6}$	
Sb	$4.0 \times 10^{-6}$	$8.0 \times 10^{-6}$	
Hg	$250 \times 10^{-9}$	$300 \times 10^{-9}$	

按以上异常下限圈出的异常如图 7-1、7-2、7-3、7-4、7-5 所示。

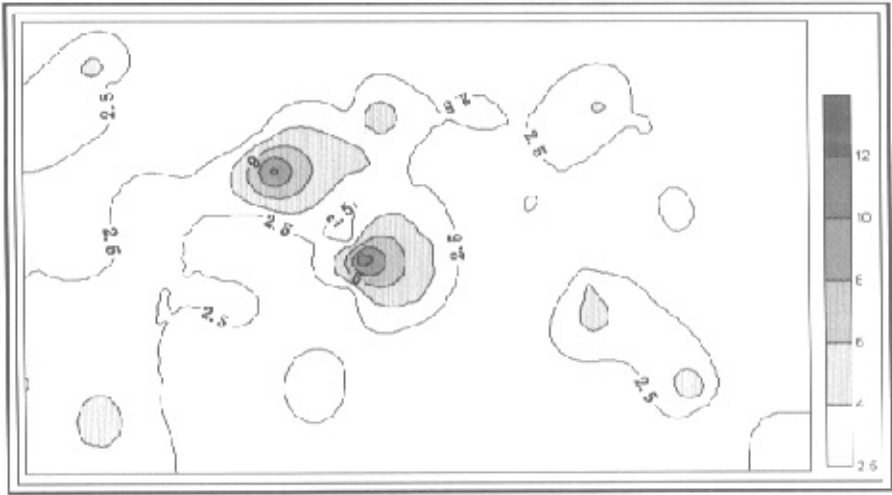


图 7-1 用常用方法圈定的 Au 元素异常图

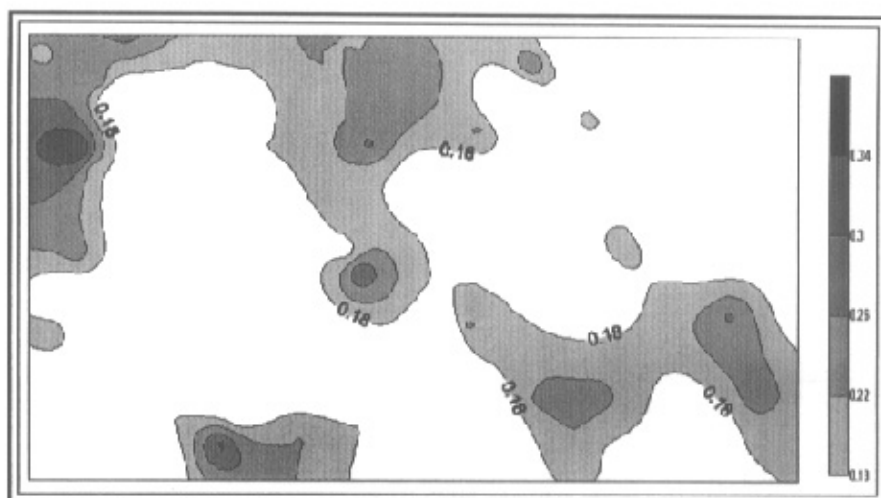


图 7-2 用常用方法圈定的 Ag 元素异常图

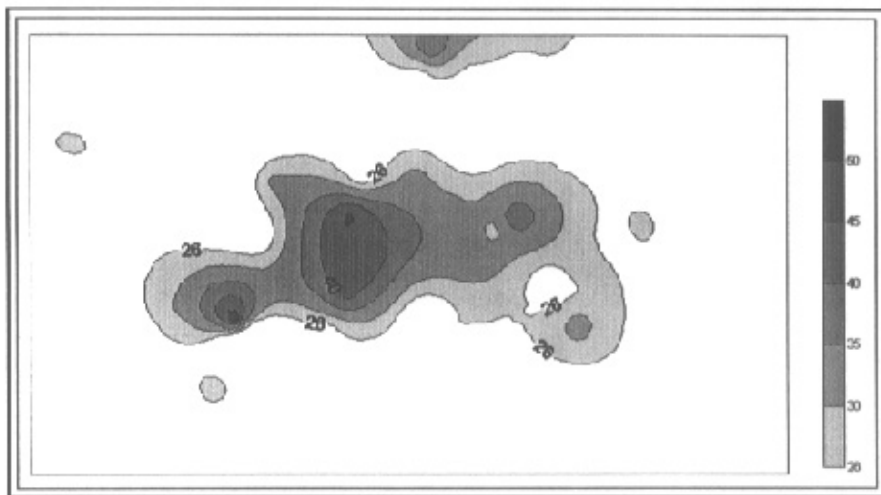


图 7-3 用常用方法圈定的 As 元素异常图

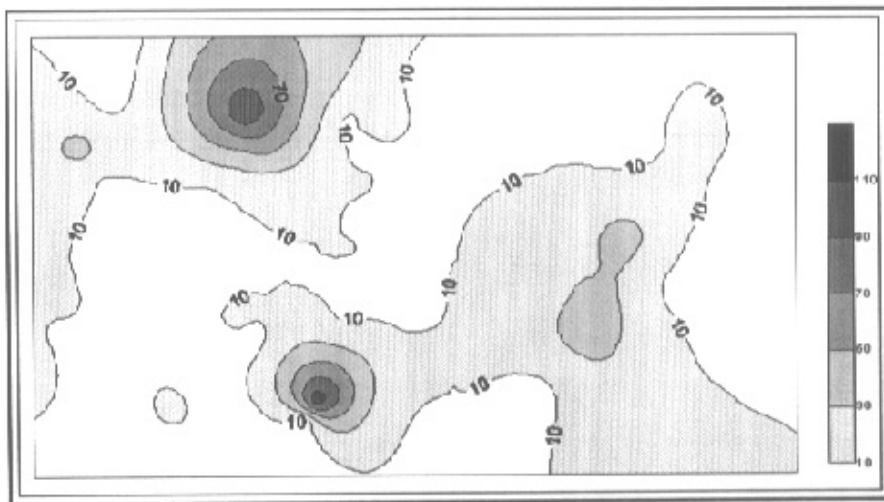


图 7-4 用常用方法圈定的 Sb 元素异常图

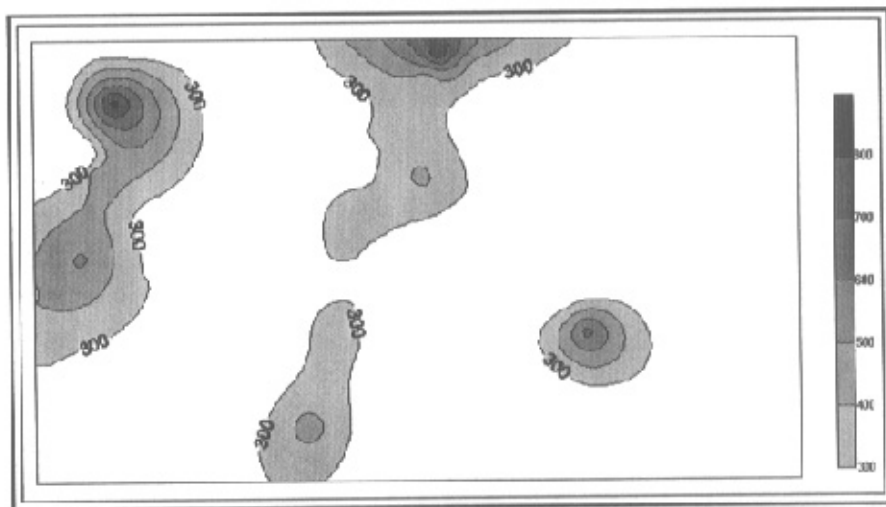


图 7-5 用常用方法圈定的 Hg 元素异常图

### 7.1.2 数据滤波法确定背景值与异常下限

本文采用子区中位数滤波法进行背景和异常的划分,子区中位数衬值滤波法是在对已知的各种化探数据处理方法进行系统研究的基础上,吸收了 EDA (Exploratory Data Analysis 勘查数据分析技术)技术和滤波技术,开发出的一种处理区域化探扫面数据的计算机数据处理方法。这一技术为实现区域化探异常的快速筛选与识别奠定了良好的基础。

从上文的分析中我们可以知道,经典统计学方法都有严格的基本假设条件,从而不能真实地描述化探数据的特性, Tukey 引入了稳健统计学,并提出了一种新的非常规的

数据处理方法——勘查数据分析技术，近年来已经引起人们的重视。这种方法不要求任何假设条件，而是根据数据本身固有的特性来识别异常点，确定背景总体和异常总体，且不需要预先对原始数据作任何数学处理。EDA 技术中的一套统计参数是数据集的中位数、2 个极值点和上下四分点，这利用下式来识别异常

$$F_u = Q_u + 1.5 \times S_h \quad (7-1)$$

$$F_l = Q_l - 1.5 \times S_h \quad (7-2)$$

其中  $F_u$  和  $F_l$  为异常临界值， $F_u$  相当于异常下限， $F_l$  相当于异常上限， $Q_u$  为四分点， $S_h$  为内散度。

EDA 方法中 25% 的数据被认为可能是“野”的，这些“野值”对中位数和节点（上、下四分点）不产生影响，而异点临界值仅由内散度决定，所以异点临界值就不会受异点的影响。与稳健统计量相反，只要有一个极值点就会给常规经典统计学上的算术平均值和标准离差带来很大的影响。因此，EDA 技术识别异常的一个显著特点就是能够抵抗干扰和“野”数据的影响，当然，这些所谓的“野”数据也可能本身就是异常。子区中位数衬值滤波法就是在上述 EDA 技术的基础上研究出来的。

为了研究本区的 Au 异常分布情况，对研究区的化探数据运用子区中位数衬值的处理方法：

以  $3 \times 3$  个单位格子作为中心窗口，求其中位数作为中心格子的趋势值 ( $CW_m$ )。取  $9 \times 9$  个单位格子中的中位数作为背景值 (AT)，采用  $F_u = Q_u + S_h$  作为异常下限。然后计算  $CW_m$  与  $F_u$  的比值 FC (即衬值)，凡  $FC > 1$  则表明元素具有明显的正异常。根据衬值来圈定地球化学异常可以有效的识别异常。

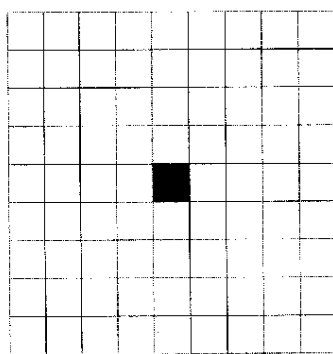


图 7-6 子区中位数衬值滤波示意图

子区中位数衬值滤波法 (SAMCF) 用窗口代子区，以小窗口为局部异常或噪音，以大窗口为局部背景，逐点移动，使得每一点或子区的背景不同，把地球化学背景面看成一个连续起伏变化的曲面。即在 SAMCF 法的处理过程中，自动地把一个大区域划分

成很多个小子区（相应于地球化学小子区），每个小子区均具有自己的地球化学背景值和异常下限值。这样背景值高，异常下限就高；背景低，异常下限就低。这就从理论上解决了低背景区和高背景区弱小异常的识别问题，克服了采用全区统一异常下限，从而给异常识别带来的困难，实现了不同的地质地球化学子区采用不同的异常下限圈定异常的要求。

运用此种方法处理得到的结果如下表：

数据滤波法确定的异常参数

表 7-4

元素名称	背景值	异常下限	备 注
Au	$1.8 \times 10^{-9}$	$5.2 \times 10^{-9}$	
Ag	$0.16 \times 10^{-6}$	$0.22 \times 10^{-6}$	
As	$21 \times 10^{-6}$	$33 \times 10^{-6}$	
Sb	$8 \times 10^{-6}$	$35 \times 10^{-6}$	
Hg	$180 \times 10^{-9}$	$500 \times 10^{-9}$	

按以上异常下限勾绘出异常图如下图：

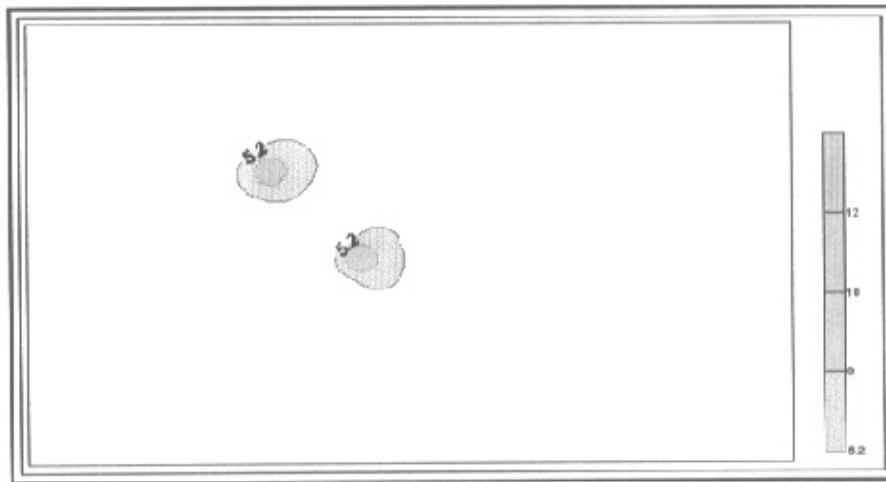


图 7-7 用数据滤波法圈定的 Au 元素异常图

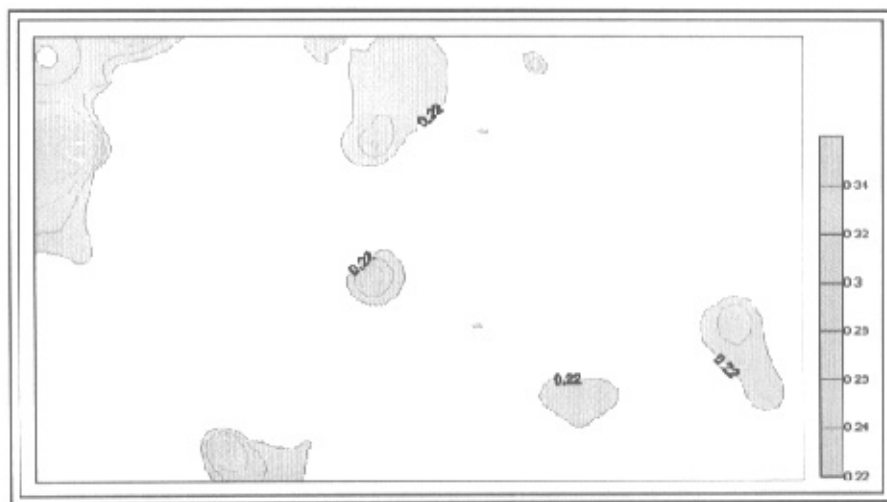


图 7-8 用数据滤波法圈定的 Ag 元素异常图

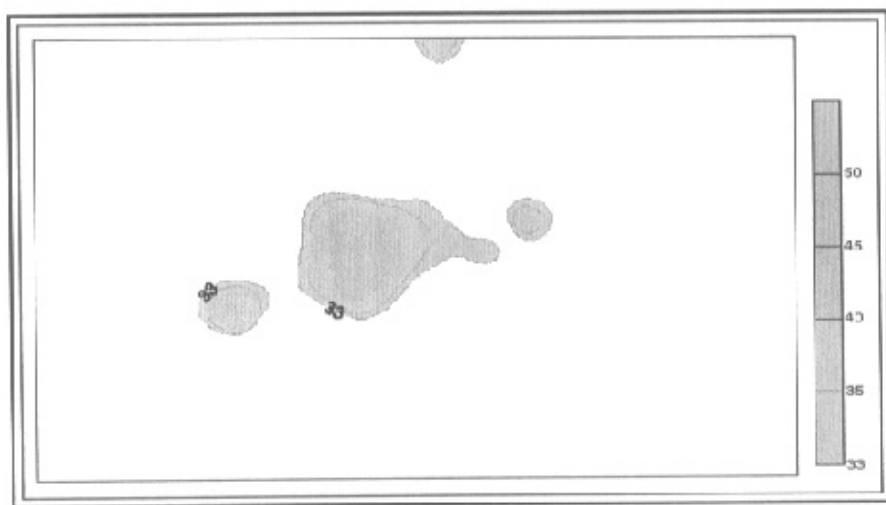


图 7-9 用数据滤波法圈定的 As 元素异常图



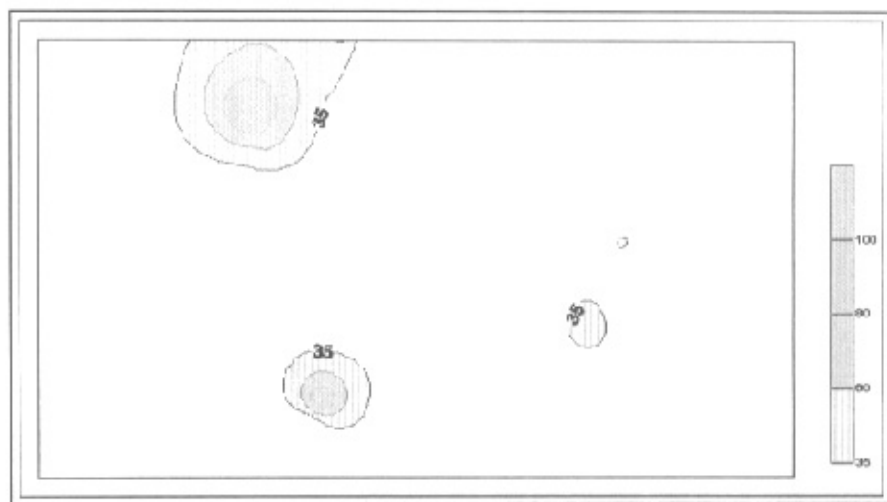


图 7-10 用数据滤波法圈定的 Sb 元素异常图

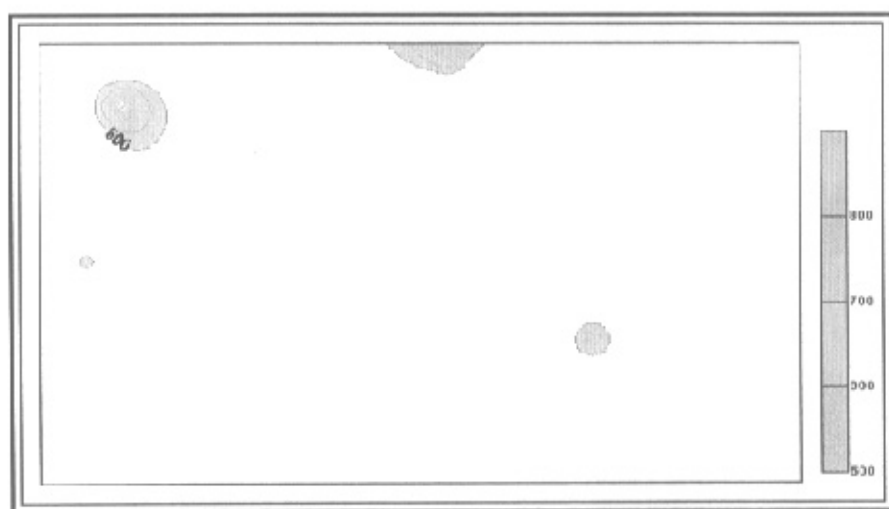


图 7-11 用数据滤波法圈定的 Hg 元素异常图

### 7.1.3 分形法确定的背景值与异常下限

基于前文(第 4 章)的理论认识,为了研究本研究区与金元素有关的元素分形特征,本研究过程运用元素含量-面积模型对研究区的五种元素化探数据进行分形处理。运用 MapGis 的空间分析功能,统计元素的含量与对应面积之间的关系,得到的结果如下表所示:

Au 元素含量与对应面积之间的关系 表 7-5

元素含量	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
对应面积	68692	61792	49531	27788	15493	7049	2678
元素含量	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
对应面积	1734	1319	1080	863	688	557	437
元素含量	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	
对应面积	326	255	161	67	16	6	

Ag 元素含量与对应面积之间的关系 表 7-6

元素含量	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.21
对应面积	42693	68995	59942	43273	38000	30343
元素含量	0.23	0.25	0.27	0.29	0.31	0.33
对应面积	15927	4695	2234	1766	636	68

As 元素含量与对应面积之间的关系 表 7-7

元素含量	10.5	14.0	17.5	21.0	24.5	28.0
对应面积	17010	37769	88081	90330	44324	21515
元素含量	31.5	35.0	38.5	42.0	45.5	
对应面积	14226	6349	3922	3189	25	

Sb 元素含量与对应面积之间的关系 表 7-8

元素含量	3	8	13	18	23	28	33
对应面积	97255	68140	40186	28572	16297	10449	6075
元素含量	38	43	48	53	58	63	68
对应面积	3823	2691	2488	2430	2346	1958	1582
元素含量	73	78	83	88	93	98	103
对应面积	1299	1049	820	619	381	232	57

Hg 元素含量与对应面积之间的关系 表 7-9

元素含量	120	160	200	240	280	320
对应面积	54390	59796	47254	30547	24669	23318
元素含量	360	400	440	480	520	560
对应面积	14132	9980	5191	2842	1702	1229
元素含量	600	640	680	720	760	
对应面积	844	627	479	427	122	

利用 grapher 软件将元素含量与其对应的面投在双对数坐标轴上，可以得到如下图所示的关系。

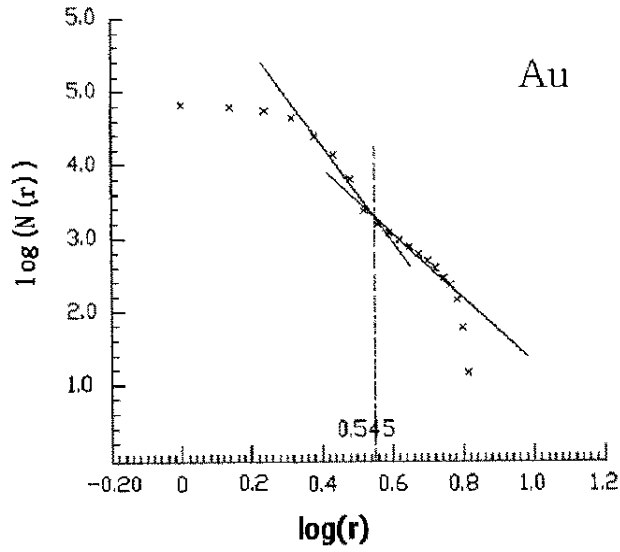


图 7-12 Au 元素含量值与对应面积值的关系

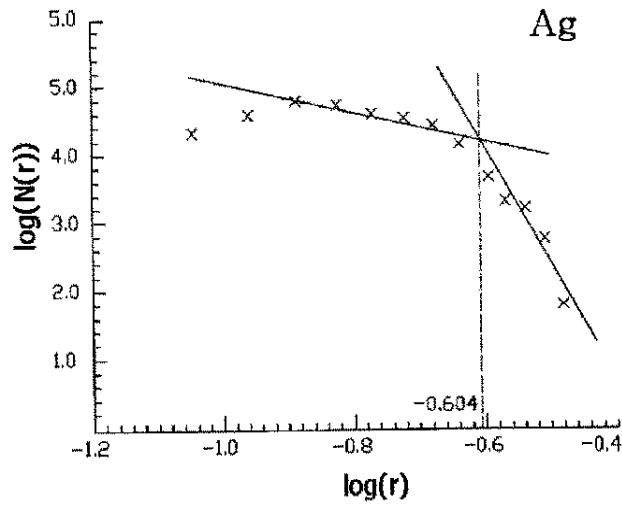


图 7-13 Ag 元素含量值与对应面积值的关系

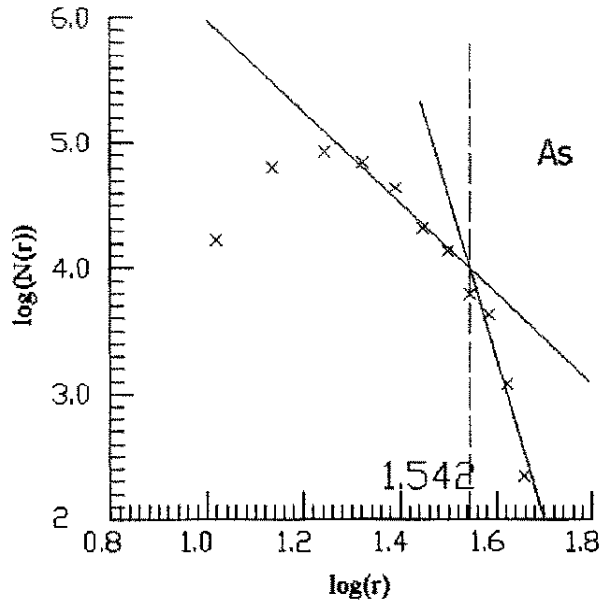


图 7-14 As 元素含量值与对应面积值的关系

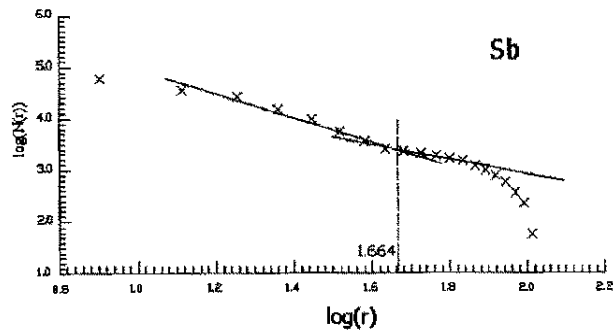


图 7-15 Sb 元素含量值与对应面积值的关系

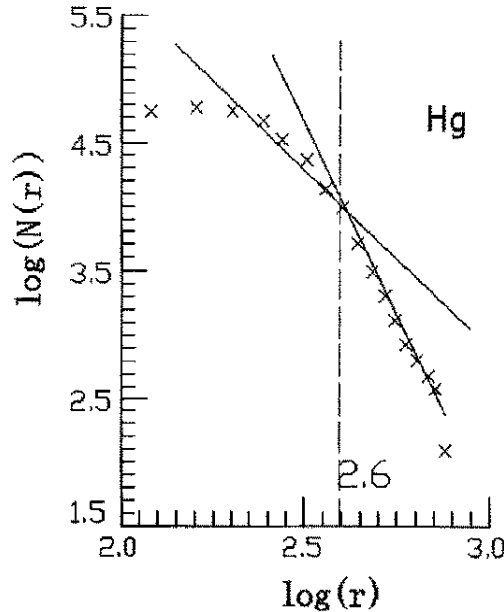


图 7-16 Hg 元素含量值与对应面积值的关系

从图中可以看出，五种元素的含量-面积双对数坐标图都有比较明显的拐点。拟合后可以计算出其对应的异常下限。值得说明的是，在拟合时，前几个点往往在拟合线的下方，沈步明（1993）在研究新疆某金矿金品位分布时也注意到了这一点，他认为，这是由于对品位（含量）的样品数不充分引起的。可以采用一些方法进行校正，但是校正的结果与忽略这些点所得到的结果是一样的。由于此部分不是本文研究的重点，因此，本文对前几个低值点均采用忽略不计的方法进行处理。

利用前文分形的有关原理，可以求出各元素的背景和异常的分界值，如下表所示。

分形法确定的异常参数 表 7-10

元素名称	异常下限	备注
Au	$3.51 \times 10^{-9}$	
Ag	$0.25 \times 10^{-6}$	
As	$35 \times 10^{-6}$	
Sb	$46 \times 10^{-6}$	
Hg	$400 \times 10^{-9}$	

## 7.2 根据分形理论和方法对该区金异常图的绘制和对比

### 7.2.1 根据分形理论和方法对该区金异常图的勾绘

由上文用分形理论和方法所确定的金的异常下限，可以做出如下的异常图。

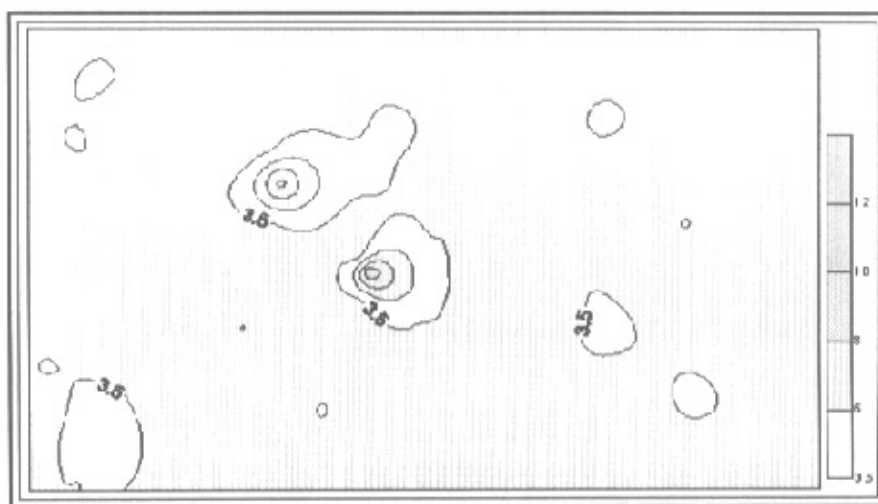


图 7-17 用分形理论和方法所圈定的本区 Au 元素异常图

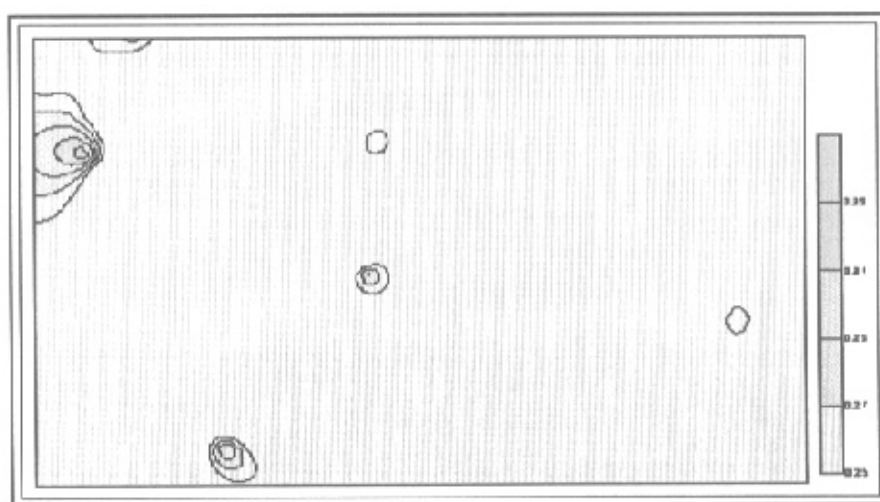


图 7-18 用分形理论和方法所圈定的本区 Ag 元素异常图

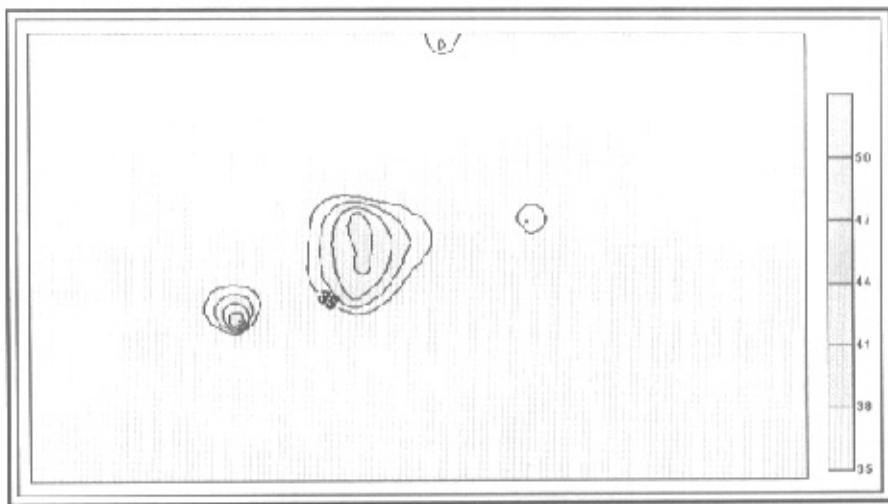


图 7-19 用分形理论和方法所圈定的本区 As 元素异常图

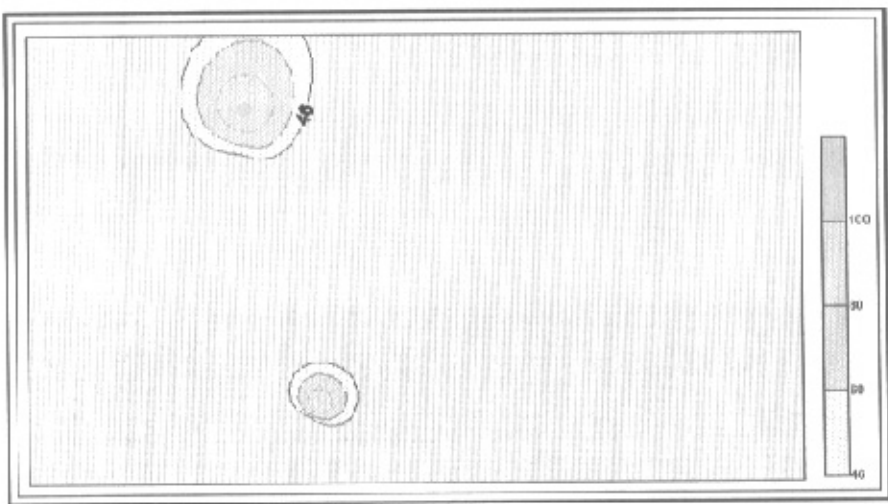


图 7-20 用分形理论和方法所圈定的本区 Sb 元素异常图

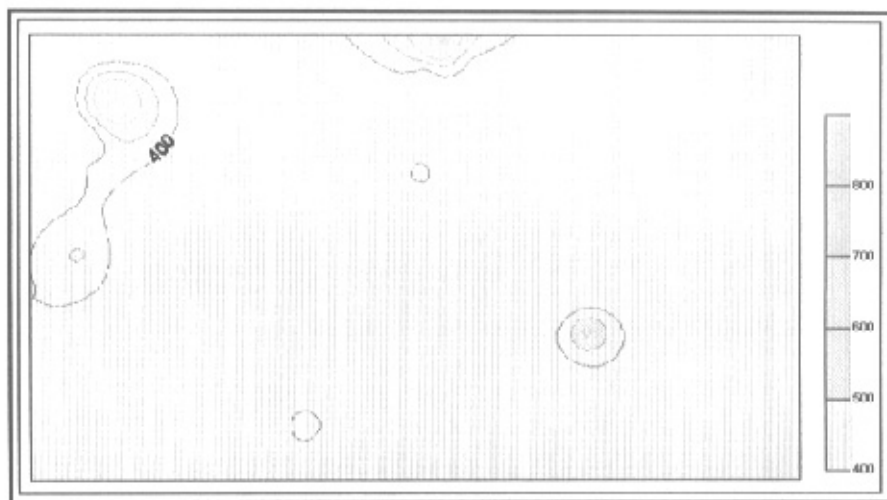


图 7-21 用分形理论和方法所圈定的本区 Hg 元素异常图

### 7.2.2 与前任对本区勾绘的金异常的结果对比

我们把用常用方法、数据滤波法、分形理论和方法确定的异常勾绘的异常图以及生产单位圈定的异常图进行对比。

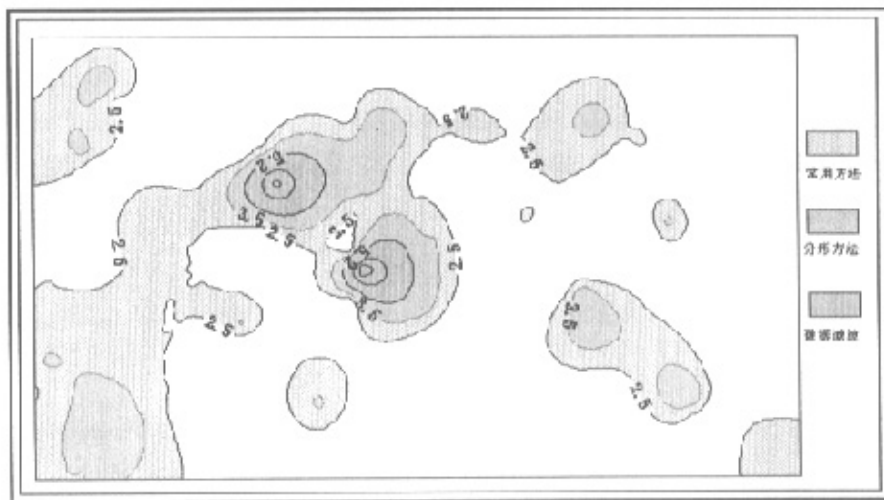


图 7-22 三种方法圈定的本区 Au 元素异常对比图



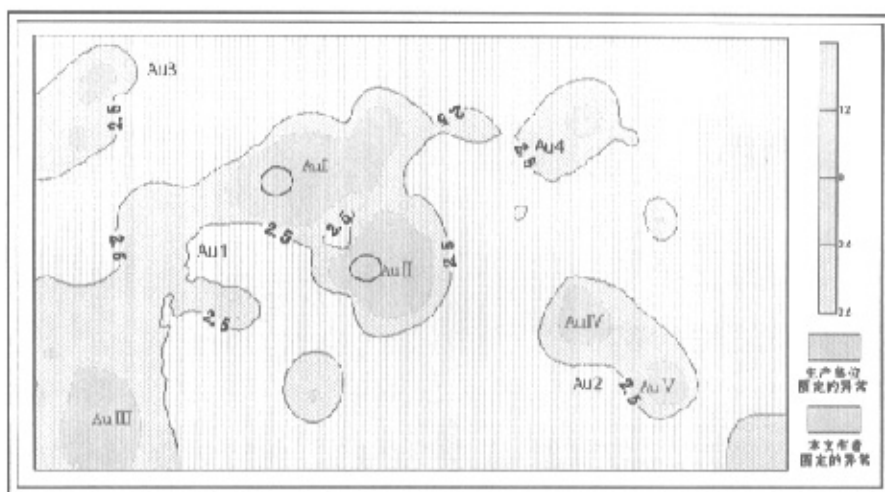


图 7-23 作者勾绘的异常与生产单位圈定的异常对比图

### 三种方法圈出的 Au 元素异常晕面积对比表

表 7-11

采用的方法	常用方法	数据滤波法	分形方法
面积(km <sup>2</sup> )	12.64	0.76	3.71

由以上对比数据可以看出,用数据滤波法确定的异常下限勾绘的 Au 元素异常晕面积最小,用分形的理论和方法勾绘的异常晕次之,用常用方法勾绘的异常面积最大。数据滤波法和分形理论方法均起到了缩小找矿靶区、有效识别异常的目的。但对本研究区而言,由于面积较小,数据滤波法虽然识别出了较强的异常,但是遗漏了虽然弱小但是仍然有价值的异常,这是由其本身的特点决定的,它更适合于区域性的异常识别。从本文作者在野外的异常查证结果也证实了这一点。

## 8 分形理论和方法勾绘的该区金异常与本区地质找矿实际的应用对比和验证

根据四川省核工业地调院采用水系沉积物金地球化学勘查分析结果，最终找到 C 金矿床（化）点的实际情况看，该金矿床（点）恰落于本文运用的分形理论和方法勾绘的金地球化学异常靶区中（见图 8-1）。在导师的建议下，核工业地调院于 2005 年 4 月至 10 月进行了野外查证工作，布置了如图 8-2 所示的工程，发现了一个金锑矿体，一个金锑矿化体。如下图 A、B 点所示。

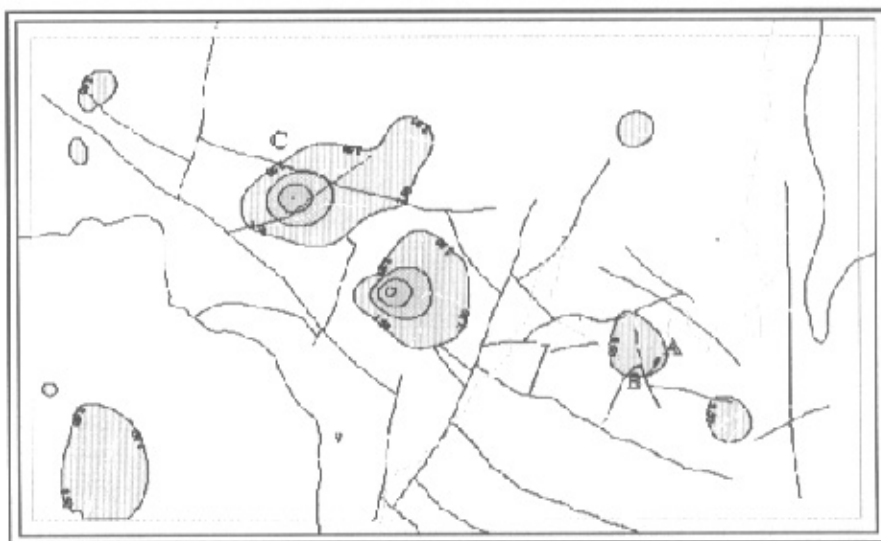


图 8-1 作者圈定的 Au 元素异常与矿点位置对比图

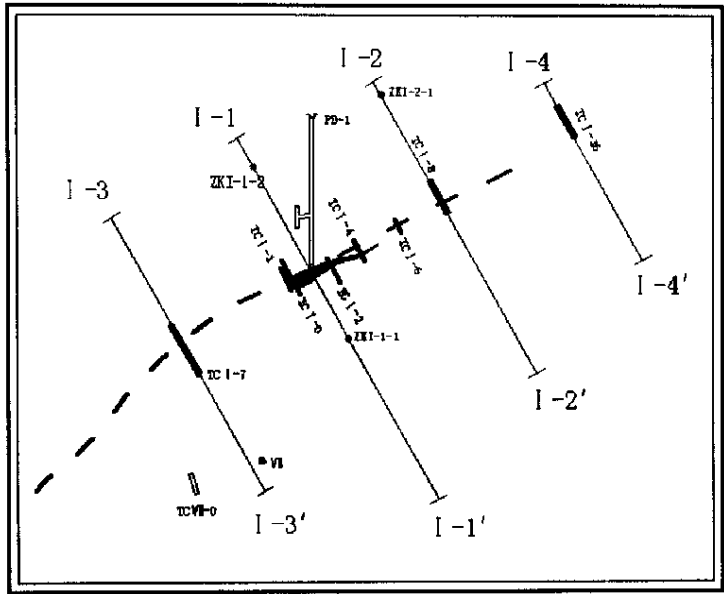


图 8-2 A 矿点处工程布置示意图

从图 8-2 A 矿点处工程布置示意图上可以看出，共布置了 8 个探槽工程，即 TC I-7、TC I-1、TC I-0、TC I-2、TC I-4、TC I-6、TC I-8、TC I-16，3 个钻孔：ZK I-1-1、ZK I-1-2、ZK I-2-1，1 个坑道 PD-1。

工程统计表 表 8-1

工程编号	揭露目的	揭露结果
TC I-0	揭露金矿体的矿化情况	>1g/t
TC I-1	揭露金矿体的矿化情况，及其矿体沿走向上延伸情况	>0.1g/t
TC I-7	揭露金矿体沿走向上延伸情况	无矿
TC I-2	揭露金矿体的矿化情况	>1g/t
TC I-4	揭露金矿体的矿化情况，及其矿体沿走向上延伸情况	>1g/t
TC I-6	揭露金矿体沿走向上延伸情况	无矿
TC I-8	揭露金矿体沿走向上延伸情况	无矿
TC I-16	揭露金矿体沿走向上延伸情况	无矿
ZK I-1-1	了解金矿体深部矿化情况及地质情况	>0.1g/t
ZK I-1-2	了解金矿体深部矿化情况及地质情况	>0.1g/t
ZK I-2-1	了解金矿体深部矿化情况及地质情况	>0.1g/t
PD-1	了解金矿体浅部矿化情况及地质情况	>1g/t



图 8-3 TCI-0 揭露出的含金石英—辉锑矿脉

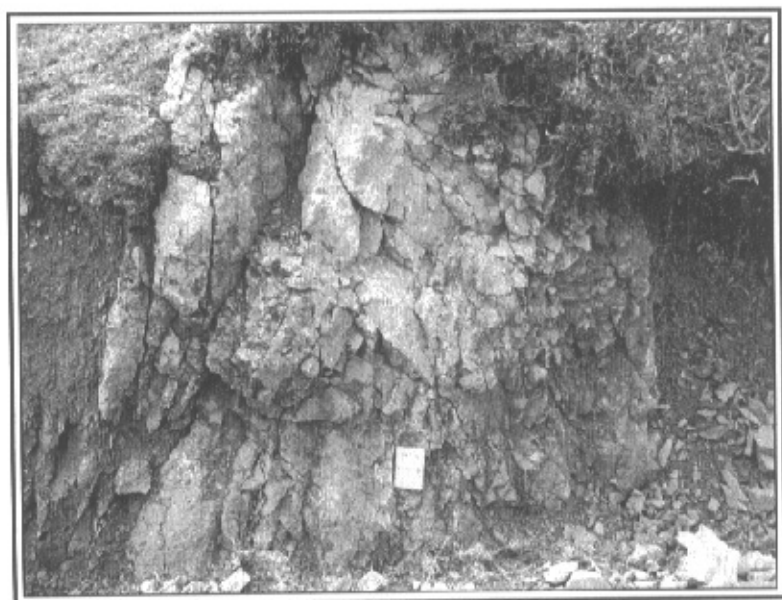


图 8-4 TCI-2 揭露出的含金石英—辉锑矿

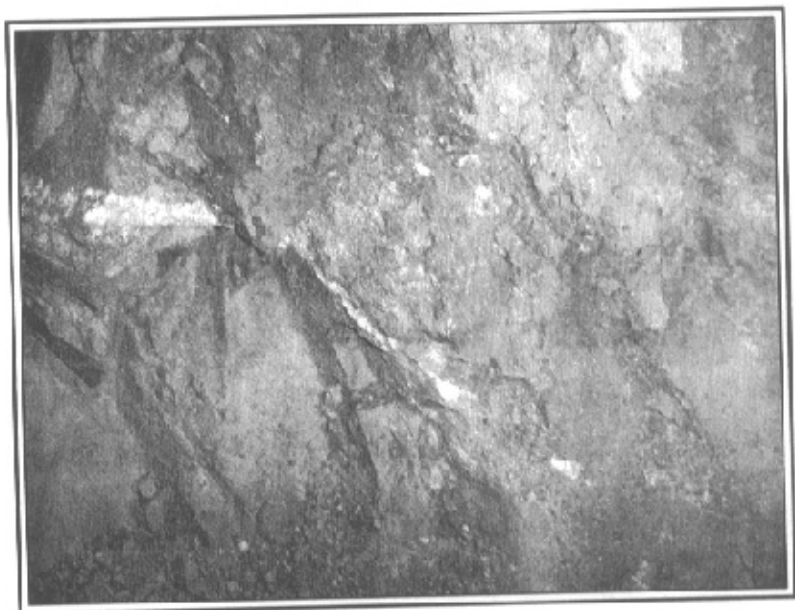


图 8-5 坑探揭露出的含金石英—辉锑矿脉

图 8-3、8-4、8-5 为槽探照片及坑探照片，从照片上可以看到含金石英—辉锑矿脉，从采样分析的结果来看，矿石金品位最高 14.75g/t，多在 0.1~5.08g/t 之间，锑含量一般都在 0.02~19.65%。

图 8-1、8-2、8-3、8-4、8-5，表 8-1 以及采样分析结果等资料，可以证明 A 矿点确实存在并可能有一定开采价值，从而印证了分形理论和方法确定异常下限、勾绘异常的实际有效性。

## 9 结论

本文通过对四川省若尔盖阿细龙曲地区金地球化学异常和数据处理的常用方法、数据滤波法和分形理论和方法的应用对比研究,取得以下成果:

1. 首次运用分形理论和方法,合理圈定金矿异常,为本区金矿找矿提供了优选靶区。
2. 经野外地质勘查,本文圈定的异常为金矿化异常,生产单位在该异常地段发现了二个金矿床(点)。
3. 通过勘查地球化学数据处理的常用方法、数据滤波法和分形理论和方法在本区应用对比研究,发现运用分形理论和方法所圈定的金异常,在异常显著的情况下,异常下限高于常用方法确定的异常下限,从而可以减少异常查证的面积,达到迅速定位靶区提高工作有效性的目的;在异常不显著的情况下,该方法也可以反映异常信息,避免漏掉有价值的异常信息。
4. 地球化学异常是元素在空间的分布,它既具有有序性,又具有随机性,从而使地球化学异常产生复杂的分形结构。分形理论为我们研究地球化学异常的空间结构提供了一种新的思路。而且在应用时勿需对分析数据进行预处理,判断是否符合正态分布或对数正态分布,以及进行特高值和特低值的剔除,使用较为简便。

## 10 致谢

我衷心地感谢我的二位导师巫晓兵副教授和张成江教授，正是在他们的悉心指导与帮助下，我才能顺利地完成本论文。在本论文的编写过程中，从资料的收集、论文选题到初稿形成，再到最后的定稿，无不浸透着二位导师的心血和对学生的深情。在三年的研究生学习期间，导师巫晓兵教授给予了我无微不至的关怀与悉心的指导，无论在学业上、生活上还是思想道德修养上，我所取得的每一点进步，无不饱含着导师的心血和汗水。特别是他严谨的治学态度，清晰的研究思路，忘我的工作精神，严以律己、宽以待人的处事原则将会使我终生难忘，并引领我做好以后的工作。虽然导师巫晓兵副教授在我就学最后一个学期因工作需要被四川省核工业地质局调走，但他为我提供了更好的研究条件，对我的学业要求不仅没有放松、而且更加严格。张成江教授在学业和生活上给予了我很多的指导与帮助，他与人为善、以诚待人的处事方式使我受益匪浅。同时非常感谢核工业局地调院黄昌华副总工程师在野外工作中以丰富的实践知识给予我的辛勤指导与帮助。感谢孙建萍老师、李佑国教授在论文写作过程对我的支持与帮助。感谢倪师军教授、罗梅教授、尹观教授、刘峰副教授等在专业学习上给予我的指导和帮助。

感谢四川省核工业地质调查院为我的论文工作提供各种资料和帮助，特别感谢龚彬、贾西平二位工程师及其同事在野外工作中给予我的指导与帮助。

感谢我的师弟陈亮、师妹高琴在成文过程中给予我的建议与帮助；感谢与同学一起度过的三年宝贵时光，与他们一起交流学习并进行有益的讨论，使我开阔了视野、激发了灵感、拓宽了思路。

同时，我特别向被本文引用的文献、论文和图件的版权所有者表示诚挚的谢意，他们的研究成果为本文的研究提供了重要的基础和思路。



# 11 参考文献

- [1] 黄昌华、龚彬等, 四川省若尔盖县阿细龙曲金矿普查阶段性报告, 2004. 12.
- [2] 巫晓兵、黄昌华等, 四川省若尔盖县阿细龙曲金矿成矿地质特征对比研究及找矿远景分析, 2005.12.
- [3] 陶正章, 地球化学找矿, 地质出版社, 1981. 7.
- [4] 李正文、贺振华等, 勘查技术工程学, 地质出版社, 2003. 6.
- [5] 李建东, 分形理论在勘查地球化学中的应用, 中国地质大学硕士论文, 2004. 7.
- [6] 施俊法, 地球化学异常的空间分形结构: 理论与应用, 中国地质大学博士论文, 2000. 7.
- [7] 张艳秋, 区域地球化学数据处理方法及应用研究, 长春科技大学硕士论文, 2000. 7.
- [8] 黄瑞, 化探数据处理方法研究, 成都理工大学硕士论文, 2005. 6.
- [9] 申维. 成矿预测中分形模型分维数估计的新方法[J], 长春地质学院学报, 1997, 1: 58-70.
- [10] 孟宪国, 赵鹏大. 论地质现象中的分形统计学[J], 地球科学, 1996, 22(1): 601-603.
- [11] 纪宏金, 林瑞庆, 周永旭. 关于若干化探数据处理方法的讨论, 地质与勘探, 2001, 37(4): 56~59
- [12] 陈明, 李金春. 化探背景与异常识别的问题与对策, 地质与勘探, 1999, 35(2): 25~29
- [13] 吴锡生, 纪宏金, 陈明. 化探数据处理的发展, 现状与趋势, 物探化探计算技术, 1994, 16(1): 87~92
- [14] 李长江, 麻士华. 化探数据处理的高新技术, 地质找矿丛论, 1997, 12(4): 57~64.
- [15] 谢学锦. 中国化探走向 2000 年. 物探与化探, 1992, 16(2): 81-85.
- [16] 朱有光, 李泽九, 胡以铿. 区域地球化学异常系统评价的思路与方法. 地质科技情报, 1997, 16(2): 97~103.
- [17] 何起良, 褚晓吉. 对化探异常评价的思考. 吉林地质, 1998, 17(2): 9~19
- [18] 谢学锦. 区域化探. 地质出版社, 1979.
- [19] 王和胜. 化探异常筛选及查证工作方法. 物探与化探, 1998, 第 4 期: 277-284.
- [20] 任天祥, 伍宗华, 汪明启. 近十年化探新方法新技术研究进展. 物探与化探, 1997, 21(6): 411~417.
- [21] 朱华平, 张德全. 区域化探异常的地球化学勘查评价方法技术进展综述. 地质与勘探, 2003, 39(2): 25~38.
- [22] 张洪恩, 陈广浩, 黄怀勇. 地理信息系统在地质现象分形研究中的应用——以云南金矿成矿研究为例. 大地构造与成矿学, 2002, 26(3): 314-[J]. 地球科学, 16(3): 282~286.
- [23] 成秋明. 多重分形与地质统计学方法用于勘查地球化学异常空间结构和奇异性分析. 学报, 2001, 26(3): 162~166.
- [24] 刘二永, 郭科, 唐菊兴, 杨林美. 分形技术用于查证化探异常. 成都理工学院学报, 2002, 29(4): 444~447.
- [25] 赵鹏大, 陈永清社, 1999. 中国地质大学刘吉平, 等. 地质异常成矿预测理论与实践[M]北京: 中国地质大学出版社
- [26] 王京贵, 饶安妮. 分形理论在成矿预测中的应用. 华东地质学院学报, 1994, 17(2): 117~122.

- [27] 陈建国, 王仁铎, 陈永清. 利用分形统计学提取化探数据中的隐蔽信息并圈定地球化学异常. 中国地质大学学报, 1998, 23(2): 175~178.
- [28] Kenneth J Falconer 著; 普文曲, 刘世耀译. 分形几何——数学基础及其应用. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [29] 王仁铎. 地质统计学与分形理论的某些结合应用. 地质科技情报, 1993, 12(3): 93~96.
- [30] 施俊法, 向运川, 王春宇. 区域地球化学异常空间分形结构及其意义——以浙江省诸暨地区区域地球化学数据为例. 矿物学报, 2000, 20(3): 68~72.
- [31] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社, 1998. 190~207.
- [32] 李长江, 麻士华. 化探数据处理的高新技术. 地质找矿论丛, 1997, 12(4): 57~64.
- [33] 於崇文. 地球化学系统复杂性的探索. 地球科学, 1994, 19(3): 283~286
- [34] 施俊法, 向远川. 地球化学异常标度不变性与超低密度地球化学填图. 地质与勘探, 2000(1): 68~74.
- [35] 孟宪国, 赵鹏大, 李才伟. 试论地质现象的分形统计学. 中国地质大学学报, 1996, 21(6): 601~603.
- [36] 孟宪国. 试论非线性科学在数学地质中的地位和作用. 地球科学进展, 1993, 8(1): 67~71.
- [37] 赵鹏大. 地质勘探中的统计分析. 武汉: 中国地质大学出版社, 1990, 1-324.
- [39] 孟宪国, 周有武, 林碧英, 方位一分维估值法. 中国地质大学学报, 1992, 17: 63~68.
- [40] 谢淑云, 鲍征宇. 多重分形方法在金属成矿潜力评价中的应用. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, 31(1): 28—33.
- [41] 於崇文, 骆庭川, 鲍征宇等. 南岭地区区域地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1987. 1-543
- [42] 於崇文, 岑况, 鲍征宇等. 成矿作用动力学. 北京: 地质出版社, 1998.
- [43] 谢淑云, 鲍征宇. 地球化学场的多重分形模式[J]地球化学, 2002(2): 191~200.
- [44] 史长义, 张金华, 黄笑梅. 子区中位数衬值滤波法及弱小异常识别. 物探与化探, 1999, 23(4): 250~257.
- [45] 史长义. 异常下限与异常识别之现状. 国外地质勘探技术, 1995(3): 19—25.
- [46] 史长义. 化探数据解释推断的新方法——EDA 技术. 国外地质勘探技术, 1991(1): 38~41
- [47] 史长义. 勘查数据分析(EDA)技术的应用. 地质与勘探, 1993(11): 52~58.
- [48] 杜佩轩. EGMA 系统及其应用效果——找矿靶区的定位预测. 物探与化探, 1998, 22(5): 371~378,
- [49] 谢学锦. 区域化探. 北京: 地质出版社, 1979.
- [50] 后立胜. 区域化探数据处理的衬值变差值异常图方法初探. 江西地质, 2000, 14(1): 66~69.
- [51] 孙辉, 汪治国. 区域化探异常快速检查评价工作若干问题浅析. 地质与勘探, 1997, 33(4): 41~45.
- [52] 周永峰. 物化探异常的优选. 广西地质, 1999, 12(3): 37~42.
- [53] 张洪, 陈方伦. 铂族元素分析方法矿床地球化学及地球化学勘查. 地质出版社, 1996, [46] 梁有彬, 刘同有, 宋国仁, 金在水. 中国铂族元素矿床. 冶金工业出版社, 1998.
- [54] Journal A G Huijbregis C H, Mining Geostatistics, London; Academic Press, 1978.
- [55] Darnley A G, International geochemical mapping: a new global project, J, Geochem, Explor, , 1990, vol, 39, 1-4.