

# 应用奇异值分解与二维经验模型分解 提取金矿化致矿重力异常

陈永清, 赵彬彬

CHEN Yong-qing, ZHAO Bin-bin

中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 100083 北京

School of Earth & Mineral Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**摘要:** 奇异值分解(singular value decomposition, SVD)和二维经验模型分解(bi-dimensional empirical mode decomposition, BEMD) 2 种方法用于鲁西铜石金矿田的金矿化致矿重力异常提取。通过对比研究得出如下结论: ①基于重力数据, 由 BEMD 和 SVD 2 种方法获取的铜石金矿田的控矿因素是一致的, 为重力负异常的近圆形铜石侵入杂岩体和环绕铜石侵入杂岩体的表现为正异常的接触交代矿化带。②2 种方法一致地揭示了控矿因素和不同类型金矿化之间的空间关系: 斑岩型金矿化位于杂岩体内, 矽卡岩型铁-铜-金矿化位于内接触交代带, 卡林型和隐爆角砾岩型金矿床位于外接触交代带。③BEMD 的分解结果不但反映了控矿地质体单元(铜石杂岩体)的空间分布特征, 亦反映了铜石金矿田的其它地质单元, 如 NW 向表现为明显重力负异常的中生代火山沉积盆地, 位于铜石侵入体与中生代火山沉积盆地之间的表现为重力正异常的 NW 向基底隆起。而由 SVD 获取的致矿重力异常, 更确切地揭示了铜石侵入体和环形接触交代带内部的精细结构特征, 环形接触交代带内部具岛状形态的正重力异常可能代表铁-铜-金矿化矽卡岩体。④虽然 2 种方法在原理和过程方面都不同, 但具有明显地质成矿意义的金致矿异常皆可通过各自定义的带通滤波器获取。⑤在成矿地质背景的约束下, 由这 2 种方法获取的综合研究结果比其中任何一种方法获取的结果更全面客观地揭示了控矿因素与金矿化的空间关系。

**关键词:** 二维经验模型分解; 奇异值分解; 多重分形; 金矿化致矿重力异常提取; 铜石金矿田; 中国东部

中图分类号: P628; P618.51

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)05-0661-09

**Chen Y Q, Zhao B B. The application of both singular value decomposition and bi-dimensional empirical mode decomposition in extraction of gravity anomalies associated with gold mineralization. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(5):661-669**

**Abstract:** Two methods of the singular value decomposition (SVD) and the Bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) were applied respectively in extraction of gravity anomalies associated with gold mineralization in the Tongshi gold orefield in this paper. Conclusions drawn by the comparative study are as follows: (a) The two methods consistently reveal the ore-controlling factor in the Tongshi gold orefield on the basis of original gravity data: the Tongshi intrusion has a negative circular gravity anomaly and the ringed contact metasomatic mineralization zone around the Tongshi intrusion has a positive gravity anomaly. (b) The two methods consistently reveal the spatial relationship between the ore-controlling factors and various gold mineralizations: the skarn and porphyry types of gold deposits are located within the complex pluton and the Carlin and crypto-breccia types of gold deposits are situated within the contact metasomatic mineralization zone. (c) The image produced by BEMD not only reflects the structural features of the ore-controlling factor (Tongshi complex pluton) but also shows the distribution of other geological units in the Tongshi gold orefield such as the Mesozoic volcanic sedimentary basin in NW direction with obvious negative gravity anomaly and the concealed metamor-

收稿日期: 2011-03-03; 修订日期: 2011-03-10

资助项目: 国家自然科学基金项目《深层次致矿信息提取的非线性谱分析模型研究》(批准号: 40772197)、《数据挖掘与找矿靶区资源潜力模拟非线性技术研究》(批准号: 40972232)和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目《基于 GIS“三联式”定量成矿预测方法技术研究》(编号: 2006BAB01A03)

作者简介: 陈永清(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 矿产普查与勘探, 地球探测与信息技术专业。E-mail: yqchen@cugb.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

phic base swell in NW direction with positive gravity anomaly located between the Tongshi intrusion and the Mesozoic volcanic sedimentary basin. (d) The image produced by SVD might depict the inner structure of the Tongshi intrusion and the ringed contact metasomatic zone in more detail than that produced by BEMD. The higher gravity anomaly areas like island-shaped bodies within the ringed contact metasomatic zone may be skarn bodies with iron-copper-gold mineralization. (e) Under the constraints of the ore-forming geological setting, the result obtained from the original gravity data by combination of the two methods can depict the relationship between the ore-controlling factors and the gold mineralizations more exactly than the result obtained only by one method.

**Key words:** bi-dimensional empirical mode decomposition; singular value decomposition; multi-fractal; extraction of the gravity anomalies associated with gold mineralization; Tongshi gold orefield; eastern China

由于地质成矿过程的长期性和复杂性,记录这一过程的数据集往往具有非线性结构和非平稳的特征<sup>[1-7]</sup>,使得诸如地质统计学和傅立叶变换等传统的数据处理方法,严格意义上,并不适用于处理非线性和非平稳的数据<sup>[8-11]</sup>。为此,Huang 等<sup>[10]</sup>建立了一种自适应的信号分析技术,称为 Hilbert-Huang 变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)。该方法包括 2 部分算法,即经验模分解(empirical mode decomposition, EMD)和 Hilbert 谱分析,二者有机结合定量地刻画非线性和非平稳过程。

基于奇异性原理,李庆谋等<sup>[7,12]</sup>和成秋明等<sup>[4,6,13]</sup>发展了多重分形方法,称之为多重分形奇异值分解(multi-fractal singular value decomposition, MSVD)。奇异性普遍的存在于非线性的自然过程中,如云层建造(cloud formation)、降雨、飓风、滑坡、地震和矿化等,而这些非线性的过程可以用分形或多重分形来描述<sup>[6]</sup>。整个地质过程可以看作是不同时间的多个地质过程的叠加,而从非线性理论的角度,成矿过程可以看作是一种奇异性的地质过程,奇异性过程可以导致在很小的时间或者空间范围内能量的巨量释放或者物质的超常堆积和富集。奇异性过程中所产生的结果如矿床、矿化异常等具有分形和多重分形分布的规律,可以采用幂率(power-law)函数来度量<sup>[13]</sup>。如何从整个复杂的地质过程的结果中分离出与成矿过程有关的信息是奇异性分析的最终目的。

文中笔者将上述 2 种方法,即二维经验模分解(BEMD)和奇异值分解(SVD)应用于鲁西铜石金矿田的 1:50000 重力数据分解。论述了 2 种方法在揭示铜石金矿田深部地质结构与金矿化的空间关系上的有效性,为深部找矿提供科学依据。

## 1 SVD 和 BEMD 方法原理

### 1.1 SVD 方法原理

奇异值分解(SVD)可将矩阵分解为一系列的特

征值空间(eigenimages),奇异值分解可用于信号与噪声的分解<sup>[14-15]</sup>。由 SVD 得到的特征值表现为分形或多重分形的特征,并可由幂率关系描述。Li<sup>[12]</sup>将多重分形奇异值分解用于特征图像提取和矿产勘查中致矿异常的识别。奇异值分解可以将矩阵  $X$  分解为左特征向量矩阵、对角矩阵和右特征向量矩阵  $X$  的乘积:

$$X = USV^T \quad (1)$$

式中, $U$  为左特征向量矩阵,对角矩阵  $S$  为奇异值矩阵, $V^T$  表示右特征向量矩阵的转置。矩阵  $S$  即为  $X$  的奇异值矩阵,并沿主对角线按降序排列,其值的大小为协方差矩阵  $XX^T$  或  $X^TX$  特征值( $\lambda$ )的正平方根:

$$S = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r) \quad (2)$$

式中, $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r$  为矩阵  $X$  的奇异值, $r$  为矩阵  $X$  的秩。

奇异值分解也可表示为如下形式:

$$X = \sum_{i=1}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (3)$$

式中, $u_i$  是  $XX^T$  的第  $i$  个特征向量, $v_i$  是  $X^TX$  的第  $i$  个特征向量, $\sigma_i$  是  $X$  的第  $i$  个特征值, $u_i v_i^T$  为  $m \times n$  矩阵,是矩阵  $X$  的第  $i$  个特征空间。根据公式(3),如果利用矩阵  $X$  的所有特征值所对应的特征空间能够重构出原始的  $X$ ,那么选取前几个奇异值重构,能够包含绝大部分原始数据矩阵的信息。

奇异值具有以下性质:①奇异值分布按照主对角线呈降序排列;②奇异值  $\sigma_i$  代表了矩阵  $X$  投射到相应的特征空间  $u_i v_i^T$  的系数;③奇异值的平方与 Fourier 空间中的能谱密度值是一致的<sup>[12]</sup>。

由于奇异值矩阵呈降序排列,前几个奇异值又较大,所以前几个奇异值所对应的特征空间就包含了矩阵  $X$  的绝大部分信息。每个特征空间所对应的能量百分比  $P_i$  可由下列公式计算<sup>[12,16]</sup>:

$$P_i = \frac{\sigma_i^2}{\sum_{j=1}^r \sigma_j^2} = \frac{\lambda_i}{\sum_{j=1}^r \lambda_j} \quad (4)$$

## 1.2 BEMD 方法原理

BEMD 方法<sup>[10]</sup>能够自适应地将一组数据分解为不同频率的组成——本征模态函数(intrinsic mode function, *BIMF*)。通过筛分,可以得到从高频到低频的一系列的 *BIMF* 分量。而每一个 *BIMF* 分量包含以下性质:① *BIMF* 分量有相同的过零点数和极值点个数或者差 1;②在任一点,由极大值点构成的上包络和由极小值点构成的下包络的平均值趋于 0。筛分过程中要保证数据的极值点个数至少为 2。*BEMD* 分解可以将数据分解为有限个的 *BIMF* 分量和剩余分量,不同的 *IMF* 分量代表了不同的振动模式(oscillatory mode),而剩余分量描述了数据的整体趋势。

*BEMD* 方法过程与一维 *EMD* 类似,主要的区别在于 *BEMD* 方法矩阵中极值点的确定和包络面的拟合比一维 *EMD* 更复杂。令  $Ori(m,n)$  为待分解的二维数据,通过二维筛分过程,可将二维数据分解为有限个的二维 *IMF* 分量(*BIMF*),分别代表二维数据的不同频率(尺度)的结构特征,按照频率的由高到低,依次为  $B_1(m,n), B_2(m,n), \dots, B_l(m,n)$  则有:

$$Ori(m,n) = \sum_{i=1}^l B_i(m,n) + Res(m,n) \quad (5)$$

式中,  $B_i(m,n)$  为第  $i$  个二维 *IMF* 分量,  $Res(m,n)$  为剩余分量。一般来说,  $BIMF_1$  的频率要高于其它的 *BIMF*,但是并不是说  $BIMF_1$  任何段的频率都比其它的 *BIMF* 频率要高。需要意识到的是在相同段内,  $BIMF_i$  的频率要高于  $BIMF_{i+k}$  的频率。

在二维筛分过程中,为了提取 *BIMF*,窗口法和多二次法(multiquadric method)可分别用于极值的提取和包络面的拟合<sup>[17]</sup>。

对于任一个 *BIMF*,需设定筛分过程的停止条件,这里主要通过限定 *SD* 的大小来获取, *SD* 由 2 个相邻的筛分过程的结果得到<sup>[11,18-19]</sup>。在二维数据处理中,设定:

$$SD_j = \sum_{m=1} \sum_{n=1} \frac{|h_{j(i-1)}(m,n) - h_{ji}(m,n)|^2}{h_{j(i-1)}^2(m,n)} \quad (6)$$

式中,  $j$  为 *BIMF* 的标号,  $h_{j0}$  为每一轮筛分过程的待分解信号,  $h_{j(i-1)} - m_{ji} = h_{ji}$ ,  $m_{ji}$  为  $h_{j(i-1)}$  的上下包络面的均值。*SD* 的设定对 *BIMF* 有影响,如果 *SD* 的

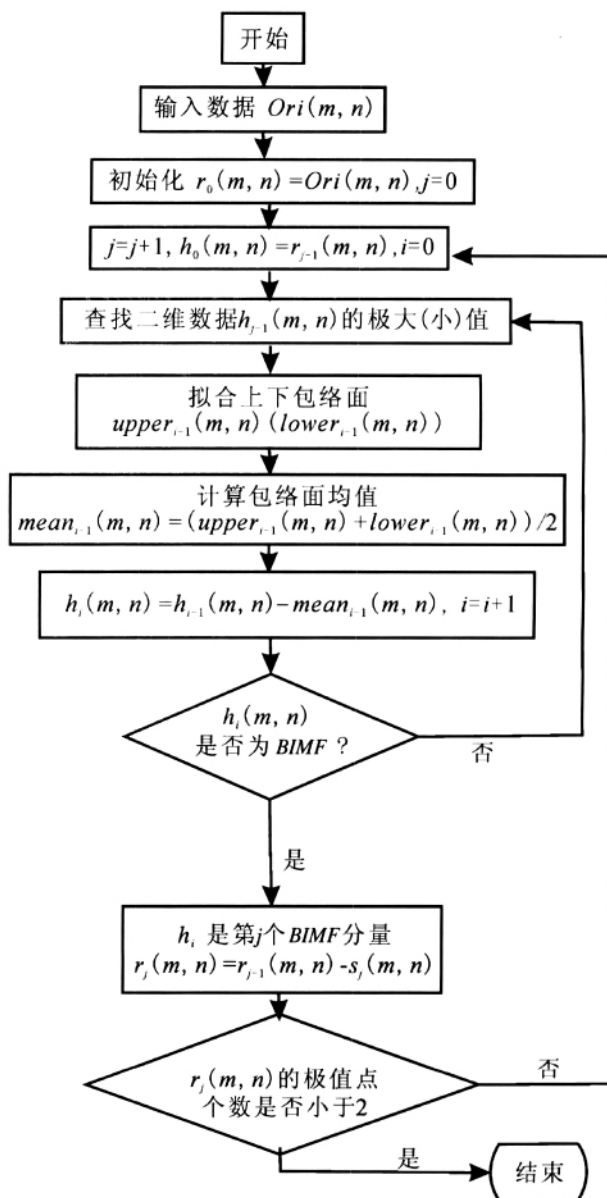


图 1 二维 BEMD 筛分过程流程(据参考文献[18-19]修改)

Fig. 1 2D sifting process procedure

值较小, *BIMF* 的个数将增加, 筛选过程也更为细致, 但运算时间会有所增加。目前 *SD* 的取值大小还没有一个统一的标准, 往往通过实践来判断和设定, 亦可借助局部均值矩阵  $mean(m,n)$  的期望值、方差获取。

与 Huang 的一维 *EMD* 方法类似, Nunes 等<sup>[18-19]</sup>提出了 *BEMD* 方法, 其流程图如图 1 所示。

Huang 等<sup>[10]</sup>检验了一维 *EMD* 的正交性。正交性可由任意 2 个 *IMF*、 $C_f$  和  $C_g$  来确定, 计算公式如下:

$$IO_{fg}=abs\left(\sum_i \frac{C_f C_g}{C_f^2+C_g^2}\right) \quad (7)$$

式中,  $C_f$  和  $C_g$  是一维 IMF 分量(二维中可以使用 BIMF 分量的不同方向的值)。IO 的值一般由分解结果和信号长度所决定。对于一维 EMD 而言, IO 的值一般小于 1%, 对于短信号数据而言, IO 一般不超过 5%。Huang 等<sup>[10]</sup>认为虽然有时分量之间不再满足正交性, 但是由 EMD 分解到的 IMF 分量依然是有意义的, 正交性只对于线性分解系统而言是必需的。

在滤波过程中, 设计不同的滤波器如  $S_{HF}(m,n)$ 、 $S_{BF}(m,n)$  和  $S_{LF}(m,n)$ , 分别用于高通、带通和低通滤波。也可以选择性地选取某些(个)反映特定频率(尺度)结构特征的 BIMF 分量作为滤波结果。

$$S_{HF}(m,n)=\sum_{i=1}^k B_i(m,n) \quad (8)$$

$$S_{BF}(m,n)=\sum_{i=k}^p B_i(m,n) \quad (9)$$

$$S_{LF}(m,n)=\sum_{i=p}^l B_i(m,n)+Res(m,n) \quad (10)$$

当然, 也可从原始地学数据中选取包含有用地质信息的特定 BIMF 分量作为滤波结果。这也是 BEMD 方法能够用于信号分解和致矿异常信息提取的主要原因。

## 2 应用对比研究

重力信息的一个显著特点是具有“透视性”, 它不仅能够反映浅部的地质现象, 而且通过对重力场的分解, 能够获取深部地质结构的信息。重力信息的另一个特点是具有多解性, 这是因为通常获取的重力数据测量的是不同规模、不同深度、不同形态和不同密度地质体组合的叠加场。这就要求我们根据地质体场的性质和特点, 借助于科学信息提取(分解)技术实现叠加场的分解, 尽可能使场与地质体一一对应, 并结合地质矿化信息等约束条件, 获取目标信息, 最终达到解决地质找矿疑难问题之目的<sup>[20]</sup>。这里, 笔者将 SVD 和 BEMD 结合应用于鲁西铜石金矿田重力致矿异常信息的提取, 目的是查明矿田深部的地质结构, 为隐伏矿体预测提供科学依据。

### 2.1 铜石金矿田地质矿化特征

铜石金矿田位于鲁西隆起区, 平邑 NW 向中生代火山岩盆地南西侧的隐伏基底区。隐伏基底下部是太古宙绿岩带——泰山群山草峪组黑云斜长变粒岩, 其上覆盖古生代碳酸盐岩。燕山期正长斑岩和闪长玢岩(统称铜石杂岩体)侵入于中生代火山岩盆地南西侧的隐伏基底区, 其  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄为 188.4~189.8Ma<sup>[21]</sup>, 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 167.9~183Ma<sup>[22]</sup>。矿化以岩体为中心具有分带现象: 杂岩体内发育斑岩型金矿化, 岩体与围岩接触带发育矽卡岩型铁-铜-金矿化, 向外碳酸盐岩中发育角砾岩型和卡林型金矿化, 其中归来庄大型金矿床具有角砾岩型和卡林型金矿化双重特征(图 2)<sup>[23-25]</sup>。

研究中所用的重力数据来源于山东省地质矿产局第二地质矿产勘查院 1991 年为配合铜石金矿田外围金矿普查实施的 1:5 万综合物探调查中的重力测量结果。其测量网距为 500m×250m, 工作总精度为  $\pm 2.32\mu\text{m/s}^2$ , 控制面积 408km<sup>2</sup>。铜石金矿田出露地质体的密度参数由高至低依次为: 泰山岩群 (2.73~2.90g/cm<sup>3</sup>)→寒武纪—奥陶纪碳酸盐岩 (2.64~2.76g/cm<sup>3</sup>)→闪长玢岩—正长斑岩 (2.61~2.71g/cm<sup>3</sup>)→侏罗纪—白垩纪火山沉积岩 (2.46~2.53g/cm<sup>3</sup>)<sup>[26]</sup>。

### 2.2 SVD 方法提取重力异常

首先利用奇异值分解方法(SVD)对鲁西铜石金矿田的 1:50000 重力数据(图 3)进行处理, 提取与金成矿有关的重力异常。

Freire 等<sup>[16]</sup>定义了低通  $X_{LP}$ 、带通  $X_{BP}$  和高通  $X_{HP}$  SVD 图像。其形式如下:

$$X_{LP}=\sum_{i=1}^{p-1} \sigma_i u_i v_i^T \quad (11)$$

$$X_{BP}=\sum_{i=p}^{q-1} \sigma_i u_i v_i^T \quad (12)$$

$$X_{HP}=\sum_{i=q}^r \sigma_i u_i v_i^T \quad (13)$$

上述 3 式中,  $p$ 、 $q$  为分割点,  $r$  为特征空间个数。 $p$ 、 $q$  的选择取决于奇异值本身。这里用多重分形的方法来确定  $p$ 、 $q$  的值。奇异性过程可以导致矿化和矿物的堆积和富集, 而这可以用幂率(power-law)模型(分形或多重分形模型)来刻画<sup>[13,27]</sup>。对于矩阵  $X$  来



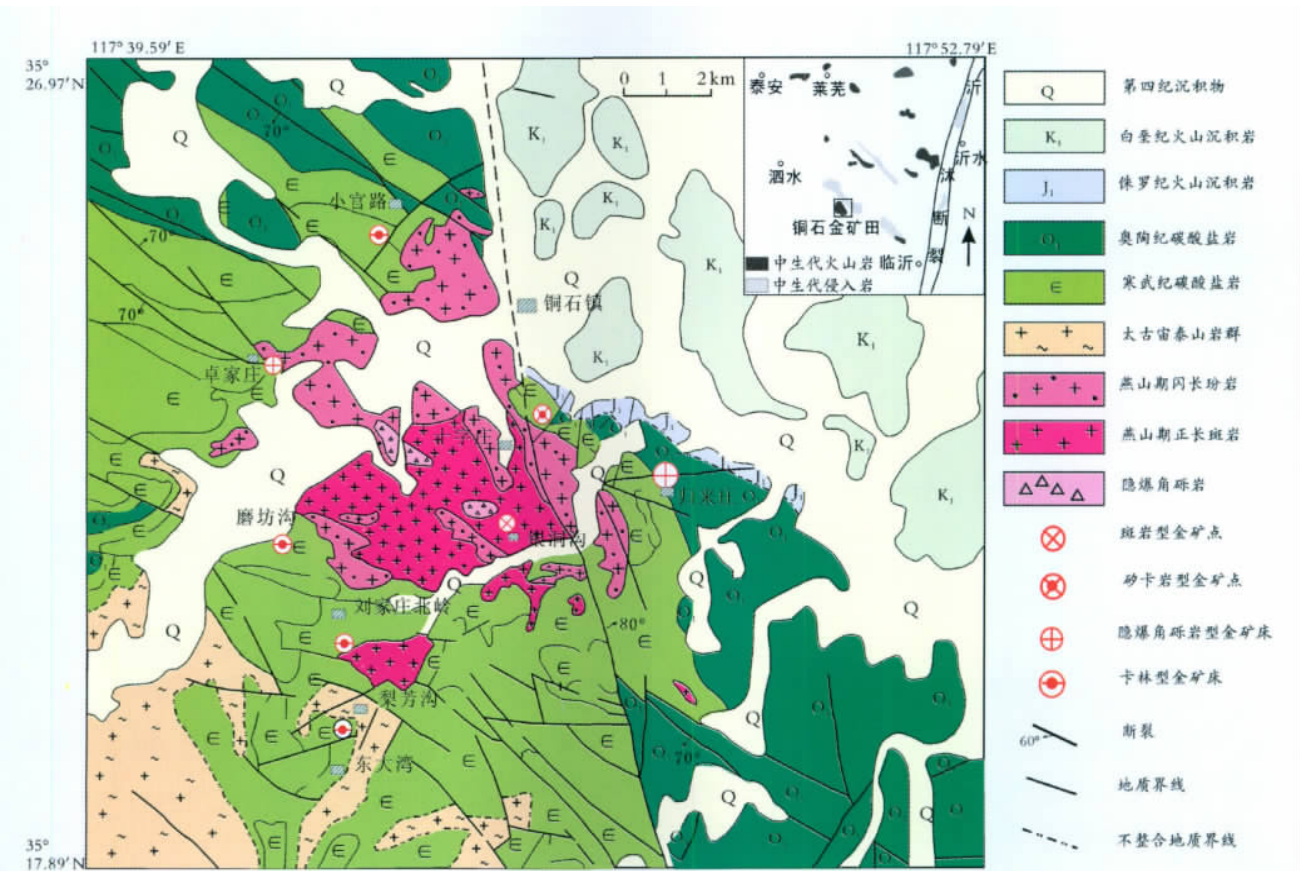


Fig. 2 Geological map of the Tongshi gold orefield

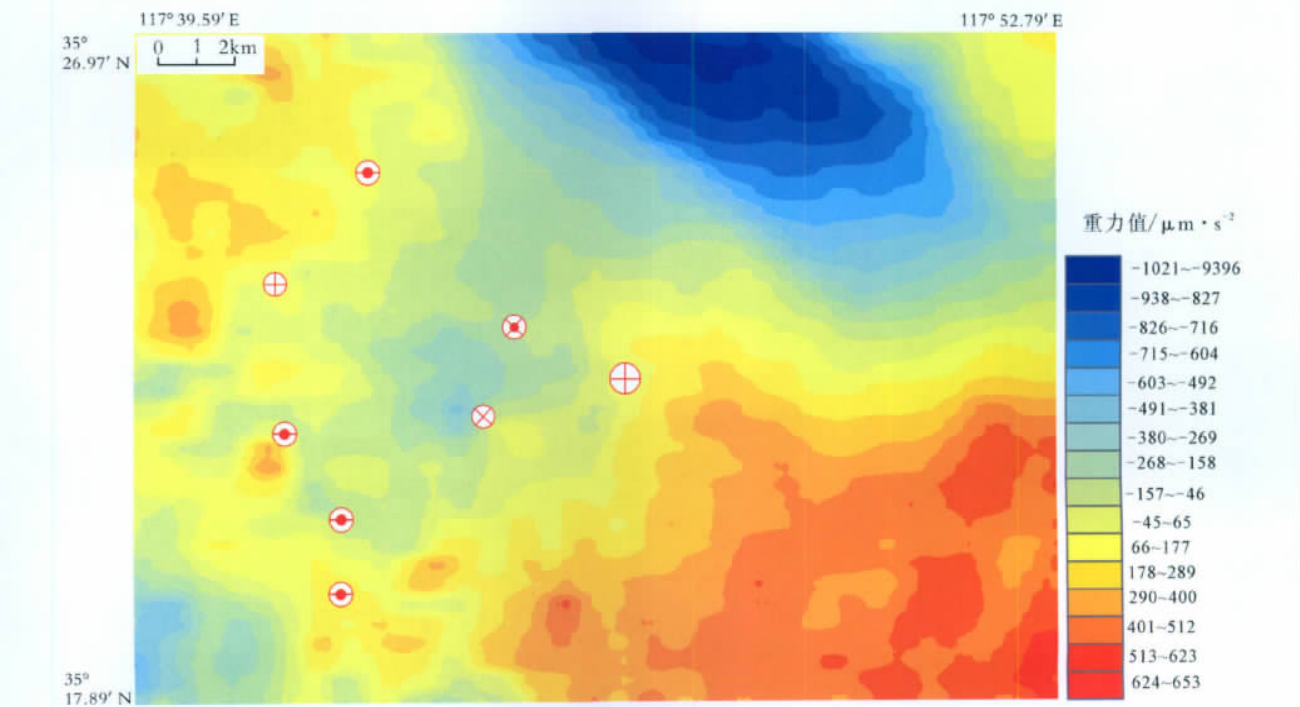


Fig. 3 Original gravity data image at the scale of 1:50000

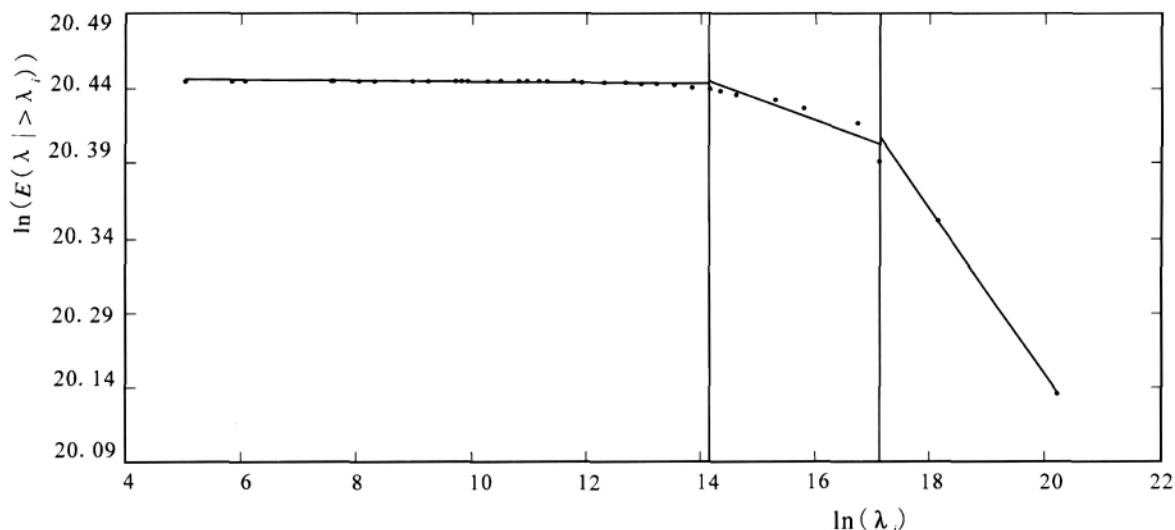
图4  $\ln(\lambda)-\ln(E)$ 对数图

Fig. 4 logarithmic diagram

使用最小二乘法拟合3条具有不同斜率的线段,分割点  $p=3, q=9, \ln(\lambda_3)=17.13, \ln(\lambda_9)=14.17$

说,可以认为投影到奇异值对应的特征空间的能量密度(能谱半径,类似于 Fourier 变换中的周期)为奇异值的平方( $\lambda$ )<sup>[12]</sup>,于是奇异值大于  $\lambda_i$  的总能量(也称为在一个能谱半径(尺度)内得到的一个能谱测度)<sup>[7]</sup>为:

$$E(\lambda | \lambda \geq \lambda_i) = \sum_{k=1}^i \lambda_k \quad (14)$$

能量所占百分比为:

$$P(\lambda | \lambda \geq \lambda_i) = \frac{\sum_{k=1}^i \lambda_k}{\sum_{t=1}^r \lambda_t} \quad (15)$$

这样一个能谱半径内对应一个能量,也可以表述为在一定的能谱尺度下能得到一个能量的测度。对秩为  $r$  的矩阵,可以得到长度为  $r$  的能量测度随能谱尺度变化的序列对。与 Fourier 变换中的能谱与频率的关系相类比,这样定义的尺度与能量测度之间具有分形规律,也即  $\lambda$  与  $E$ (或者  $P$ )之间就存在分形规律<sup>[7,12,28]</sup>,即:

$$E \propto \lambda^\alpha \quad (16)$$

$$\text{或} \quad P(\lambda | \lambda \geq \lambda_i) \propto \lambda^\alpha \quad (17)$$

上两式中, $\alpha$  为分维数,在双对数图中,表示为拟合直线的斜率。由于在  $\lambda-E$  双对数图中,可能存在不同的幂率关系(多重分形),可以根据曲线的斜率不同,用若干个直线段对曲线进行拟合。而不同线段的交点即为  $p, q$  分界点(在有些情况下直线段不止 3

段,可以存在更多的分解点)。其中同一线段的奇异值所对应的特征空间重构结果与特定的地质过程相对应。

根据特征值空间能量百分比和奇异值平方之间存在的不同区段之间的幂率关系,来确定式(11)(12)(13)中的分割点  $p, q$ 。图4为双对数图,横轴为奇异值平方的对数  $\ln(\lambda_i)$ ,纵轴为特征空间能量  $E(\lambda | \lambda \geq \lambda_i)$  的自然对数,并以  $p=3, q=9$  为分割点。中间段由  $\lambda_3 \sim \lambda_8$  组成,占总能量的 8.2%,由其重构的重力图像(图5)通常反映局部的控矿因素。

图5揭示了铜石杂岩体(重力异常值  $-399 \sim -11 \mu\text{m/s}^2$ )和围绕该岩体形成的环形接触交代带(重力异常值  $37 \sim 345 \mu\text{m/s}^2$ )。斑岩型金矿化形成于岩体内部,矽卡岩型金矿化形成于岩体与围岩的内接触带中,隐爆角砾岩型和卡林型金矿化形成于岩体与围岩的外接触交代带中,而环形接触交代带内部具有岛状形态的重力异常可能代表了具铁-铜-金矿化的矽卡岩体。因此,铜石杂岩体和环形接触交代带是发现新的潜在矿化的地区。

### 2.3 BEMD 方法提取重力异常

利用 BEMD 方法,可将原始重力数据(图3)分解为 5 个二维 BIMF 分量( $BIMF_1, BIMF_2, BIMF_3, BIMF_4$  和  $BIMF_5$ )和剩余分量  $Res(m, n)$ ,并推断深部地质结构和金矿空间分布之间的关系。

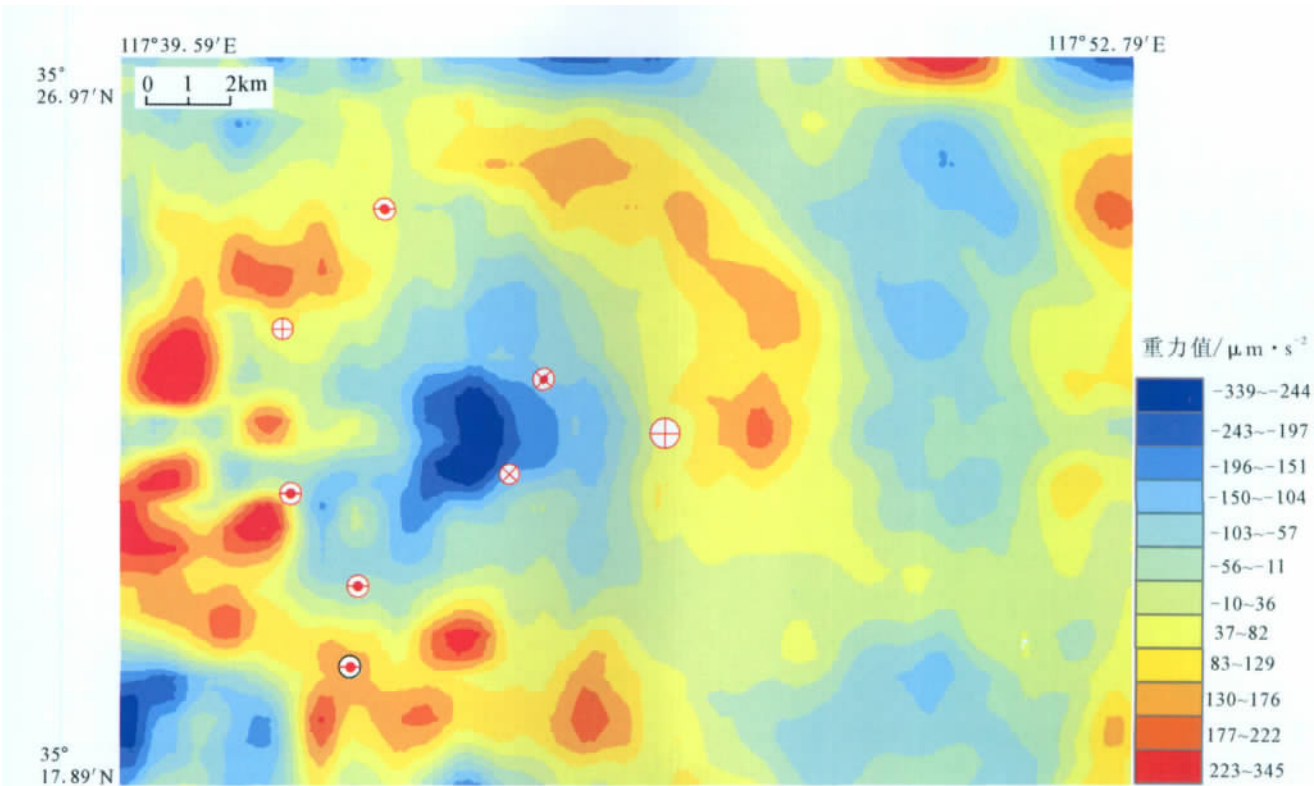


图 5 第 3 至第 8 特征空间所对应的重力图像(金矿床类型图例说明同图 2)  
Fig. 5 Reconstructed image from 3rd to 8th eigenimages

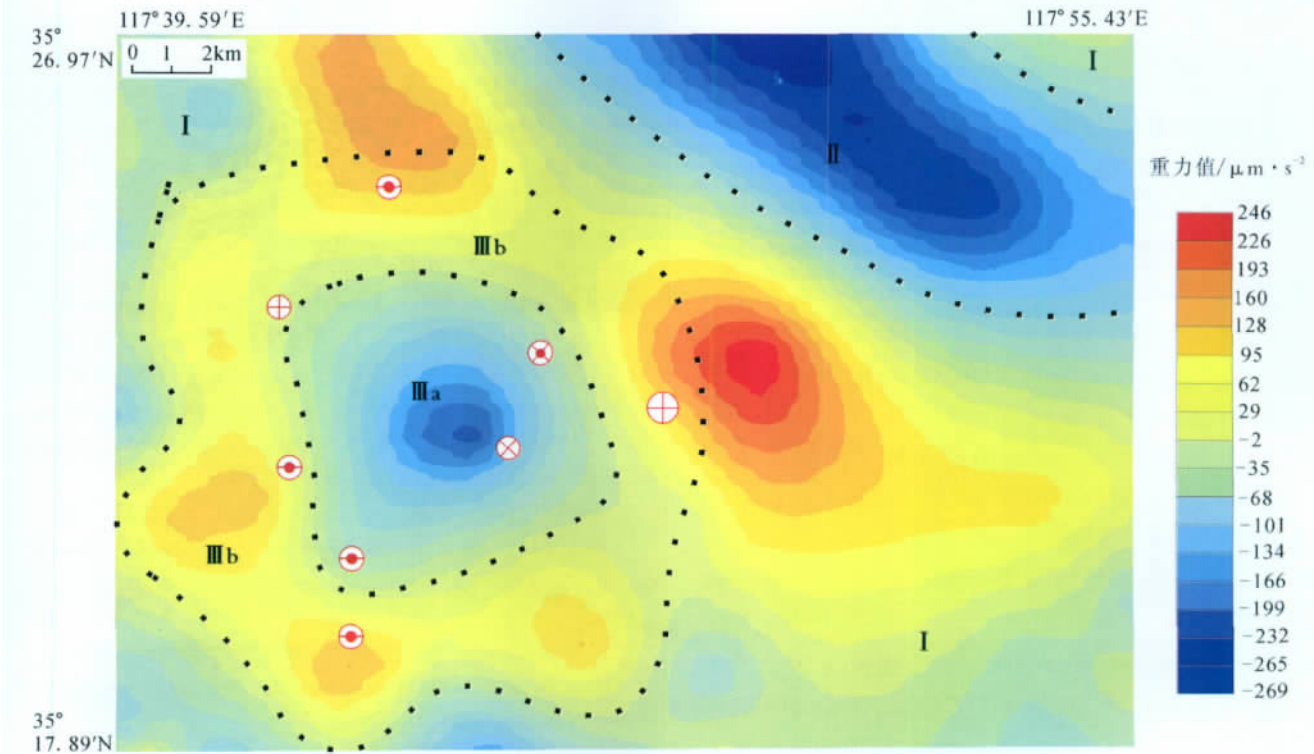


图 6 由 BEMD 方法获取的  $B1MF_3$ (金矿床类型图例说明同图 2)  
Fig. 6  $B1MF_3$  image decomposed from the original gravity data



$$Ori(m,n)=\sum_{i=1}^5 BIMF_i(m,n)+Res(m,n) \quad (18)$$

式中, $Ori(m,n)$ 为原始的二维重力数据, $BIMF_i(m,n)$ 为二维 IMF 分量, $Res(m,n)$ 为剩余分量,且极值点个数为 0。 $BIMF$  分别代表了不同频率(尺度)的二维重力数据。其中, $BIMF_3$  分量有明确的地质意义(图 6)。

图 6 所表示的  $BIMF_3$  可以理解为重力数据的带通滤波,清楚地揭示了铜石金矿田的地质结构。基于图 6,铜石金矿田可以分为 3 个地质单元。①隐伏基底区( ):表现为中等密度的重力异常,其中单元和单元之间的 NW 向高密度的正重力异常可能是由于太古代变质基底隆起引起。②中生代火山岩沉积盆地( ):沿 NW 向发育于隐伏基底( )的北东侧,并显示为明显的重力负异常;③铜石侵入杂岩体( ):侵入于隐伏基底( ),且发育于中生代火山岩沉积盆地( )的南西侧。根据重力异常特性,单元可分为 2 个次级单元,即 a 和 b。a 表现为近似圆形的重力负异常,可能为铜石侵入杂岩体。b 为围绕 a 的环形重力正异常,可能为铜石侵入杂岩体与围岩之间的接触交代带。各类型金矿床的空间分布受单元的控制(图 6)。

### 3 结 论

通过用 BEMD 和 SVD 两种方法对铜石金矿田 1:50000 重力数据的处理结果的对比研究,可以得出如下结论。

(1)对比图 5 和图 6 可知,由 BEMD 和 SVD 两种方法获得的铜石金矿田的控矿因素是基本一致的,即表现为重力负异常的近圆形的铜石侵入杂岩体和环绕铜石侵入杂岩体的表现为重力正异常的接触交代蚀变矿化带。

(2)两种方法一致地揭示了控矿因素和不同类型金矿化之间的空间关系:斑岩型金矿化位于杂岩体内,矽卡岩型铁-铜-金矿化位于内接触交代带,卡林型和隐爆角砾岩型金矿床位于外接触交代带。

(3)BEMD 的分解结果不但反映了控矿地质体单元(铜石杂岩体)的空间分布特征,亦反映了铜石金矿田的其它地质单元,如 NW 向表现为明显重力负异常的中生代火山岩沉积盆地和位于铜石侵入体与中生代火山岩沉积盆地之间的表现为重力正

异常的 NW 向基底隆起。而由 SVD 获取的致矿重力异常,更确切地揭示了铜石侵入体和环形接触交代带内部精细的结构特征,环形接触交代带内部具岛状形态的正重力异常可能代表了铁-铜-金矿化矽卡岩体。

(4)虽然 2 种方法的原理和过程都不同,但具有明显地质成矿意义的金致矿异常皆可通过各自定义的带通滤波器获取。

(5)在成矿地质背景的约束下,由这 2 种方法获取的综合研究结果比其中任意一种方法获取的结果更全面客观地揭示了控矿因素与金矿化的空间关系。

致谢:感谢山东省地质矿产局第二地质矿产勘查院为本研究提供重力数据。

### 参考文献

- [1]Cheng Q M. The perimeter-area fractal model and its application in geology[J]. Math. Geol., 1995,27(7):64-77.
- [2]Cheng Q M. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation[J]. J. Geochem. Explor., 1999, 65: 175-194.
- [3]成秋明. 矿床模型与非常规矿产资源评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2003,28(4):1-10.
- [4]Cheng Q M. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns[J]. Math. Geol., 2004, 36(3):345-360.
- [5]成秋明. 非线性成矿预测理论:多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法[J].地球科学——中国地质大学学报,2006, 31(3):337-348.
- [6]Cheng Q M. No-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments [J]. Math. Geosci., 2008, 40(5):503-532.
- [7]李庆谋,成秋明. 分形奇异(特征)值分解方法与地球物理和地球化学异常重建[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2004, 29(1):109-118.
- [8]Lovejoy S, Schertzer D, Gagnon J S. Multifractal simulation of the Earth's surface and interior: anisotropic singularities and morphology [C]//Qiuming Cheng, et al. Proceeding of IAMG'2005: GIS and Spatial Analysis. Toronto, 2005, 1:37-54.
- [9]Chen Q, Huang N E, Riemenschneider S, et al. A B-Spline approach for empirical mode decompositions[J]. Adv. Comp. Ma., 2006, 24: 171-195.
- [10]Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[M]. Proc. Roy. Soc. Lond, 1998, Ser. A 454: 903-995.
- [11]Huang N E. Beyond the Fourier transform: coping with nonlinear, nonstationary time series[BE/OL]. www. Physiconet.org/events/hrv-2006/huang.pdf, 2006.



- [12] Li Q M. GIS-based multifractal/inversion methods for feature extraction and applications in anomaly identification for mineral exploration[D]. Ph.D. Thesis, York University, Toronto, Canada, 2005:211.
- [13] 成秋明, 赵鹏大, 陈建国, 等. 奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:成矿弱信息提取和复合信息分解[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2009, 34(2): 232–242.
- [14] Glifford G D. Singular Value Decomposition & Independent Component Analysis for Blind Source Separation[M]. HST582/6.555J/16.456J, Biomedical Signal and Image Processing, 2005.
- [15] Vrabie V D, Mars J I, Lacoume J L. Modified singular value decomposition by means of independent component analysis[J]. Signal Processing, 2004, 84:645–652.
- [16] Freire S L M, Ulrych T J. Application of singular value decomposition to vertical seismic profiling[J]. Geophysics, 1988, 53(6):778–785.
- [17] Huang J N, Zhao B B, Chen Y Q, et al. Bidimensional empirical mode decomposition (BEMD) for extraction of gravity anomalies associated with gold mineralization in the Tongshi goldfield, Western Shandong Uplifted Block, Eastern China [J]. Comput. Geosci., 2010, 36(7):987–995.
- [18] Nunes J C, Bouaoune Y, Delechelle E, et al. Image analysis by bi-dimensional empirical mode decomposition[J]. Image Vis C, 2003, 21: 1019–1026.
- [19] Nunes J C, Guyot S, Delechelle E. Texture analysis based on local analysis of the Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. Mach Vis A, 2005, 16: 177–188.
- [20] Pan G C, Harris D P. Information Synthesis for Mineral Exploration [M]. Oxford: Oxford University Press, 2000:1–461.
- [21] 林景仟, 谭东娟, 金焯. 鲁西地区中生代火成活动的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(3):213–220.
- [22] 胡华斌, 毛景文, 牛树银, 等. 鲁西平邑归来庄金矿床成矿流体研究[J]. 矿物岩石, 2005, 29(1):38–44.
- [23] Chen Y Q, Liu H G. Delineation of potential mineral resources region based on geo-anomaly unit[J]. China Univ. Geosci., 2000, 11(2):158–163.
- [24] 于学峰. 山东平邑铜石金矿田成矿系列及成矿模式[J]. 山东地质, 2001, 17(3/4):59–64.
- [25] 祝德平, 张晓梅, 李守全, 等. 平邑县铜石次火山杂岩体区金矿化类型及其成矿地质特征[J]. 黄金, 2000, 21(8):8–11.
- [26] 王世称, 刘玉强, 伊丕厚, 等. 山东省金矿床及金矿床密集区综合信息成矿预测[M]. 北京:地质出版社, 2003.
- [27] Cheng Q M. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 2007, 32:314–324.
- [28] 李庆谋, 刘少华. GIS 环境下地球物理信号的奇异值分解、多维分形特征与应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1):97–102.