

doi:10.3799/dqkx.2011.034

基于二维经验模态分解的重磁异常分离

陈建国^{1,2}, 肖凡^{1,2}, 常韬^{1,2}

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 由于地质过程的复杂性及成矿过程的多期次叠加性, 原始重磁异常往往是多种地质因素的混合信息, 既包含区域背景异常信息, 也包含与矿床(体)、矿化蚀变带以及隐伏岩体等与找矿密切相关的地质要素所引起的局部重磁异常。如何从复杂的叠加重磁异常中分离出具有找矿意义的局部异常, 是当前矿产勘查和资源潜力评价工作中面临的难题之一。采用经验模态分解(EMD)方法来分解重磁异常, 为提高分解的稳健性提出了用双调和样条插值(BSI)进行包罗面插值的新方法, 并以云南个旧地区重磁数据为例, 对其进行非线性多尺度分解, 实现对区域异常与局部重磁异常的分离, 揭示了深层次找矿信息并拓宽了经验模态分解方法的应用领域。

关键词: 二维经验模态分解; 重磁异常; 数字模型; 云南个旧。

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2011)02-0327-09

收稿日期: 2010-12-10

Gravity and Magnetic Anomaly Separation Based on Bidimensional Empirical Mode Decomposition

CHEN Jian-guo^{1,2}, XIAO Fan^{1,2}, CHANG Tao^{1,2}

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Geological process often experienced a number of causal or complex genetic stages, which often resulted in original gravity and magnetic anomaly composed of various geological elements including background anomaly, and local anomaly which may be caused by deposits, alternation and concealed rocks, etc., which are associated with mineral exploration and prospecting. It is one of the most difficult issues in mineral prospecting and potential resource assessment as how to separate gravity and magnetic anomaly, which is significant for mineral exploration from original composite anomaly. Empirical mode decomposition (EMD) is considered to be an effective method in superimposed information separation. In this paper, a new bidimensional empirical mode decomposition (BEMD) method is proposed, that is, biharmonic spline interpolation (BSI) instead of general spline interpolation for improving stability. As a case study, gravity and magnetic data in Gejiu, Yunnan, China, have been used to extract local anomaly which could reveal potential information in mineral exploration by multiscale and nonlinear decomposition with BEMD method. It extends the application of empirical mode decomposition.

Key words: bidimensional empirical mode decomposition; gravity and magnetic anomaly; mathematic models; Gejiu.

地质过程的复杂性及成矿过程的多期次叠加性, 使得我们得到的地质数据往往是多种因素的混合总体(赵鹏大, 1982, 2002; 赵鹏大和孟宪国, 1992; 赵鹏大等, 1994; Xiao and Chen, 2007), 同时也决定了其具有非线性和非平稳性的特征(Cheng, 1995,

1999, 2004, 2008; 成秋明, 2003, 2006; 李庆谋和成秋明, 2004), 如重磁异常, 不仅是复杂地质过程的产物, 更是深部信息与浅部信息、区域地质信息与局部找矿信息的集合体。如何从这些多源混合性、非线性和非平稳性地学数据中提取有用的找矿信息, 一直

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40772197); 国家高技术研究发展计划“863”项目(No. 2006AA06Z113); “十一·五”国家支撑计划课题(No. 2006BAB01A01203); 教育部创新团队基金(No. IRT0755)。

作者简介: 陈建国(1964—), 男, 教授, 主要从事矿产普查与勘探、地球探测与信息技术方向的研究工作。E-mail: jgchen@cug.edu.cn

都是矿产勘查和资源潜力评价工作中一个很重要的研究方向,前人对此做了大量的工作(Cheng *et al.*, 1994; Cheng, 1995, 1999, 2004, 2007, 2008; Zhang and Ruan, 2000; 成秋明, 2001; 2003, 2006; Su *et al.*, 2003; 陈志军, 2007; Heslop *et al.*, 2007; Cheng and Agterberg, 2009; 成秋明等, 2009). 傅里叶变换、小波分析等常被用来分解复杂异常,也取得了一定的效果,但傅里叶变换、小波分析等都有一定的局限性. 傅里叶变换对于线性、平稳信号而言,是一个强有力的工具,而对于非线性、非平稳信号,该方法有其难以克服的局限性,即傅里叶变换分析必须要求系统是线性的,而且具有严格的周期性或平稳性(Huang *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2006; Huang, 2006; Yang and Tavner, 2009; Huang *et al.*, 2010). 小波变换本质上是一种窗口可调的傅里叶变换,因此,其小波窗内的信号也必须是平稳的,因而没有从根本上摆脱傅里叶变换的局限且自适应性差(Huang *et al.*, 1998; Vincent *et al.*, 1999; Gong *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2006; Yang and Tavner, 2009). 为了解决这一问题, Huang *et al.* (1998)提出了一种分析非线性、非平稳信号并具有自适应性的新方法——经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD),它引入了固有模态函数(intrinsic mode function, IMF)的概念,从原始信号中分解出有限个不同的固有模态函数,每个模态函数可能对应着不同尺度的深层次信息. Nunes *et al.* (2003a, 2003b)在一维经验模态分解基础上提出了二维经验模态分解(bidimensional empirical mode decomposition, BEMD)的解决方案,并将 BEMD 成功地用于图像分析中.

从经验模态分解的方法提出至今,它引起了人们的广泛关注,现已成为信号分析领域的热门话题. 该方法在信号处理(Huang *et al.*, 1998, 1999; Huang, 2000; Agarwal and Tsoukalas, 2007)、生物医学(Vincent *et al.*, 1999; Echeverria *et al.*, 2001; Pines and Salvino, 2002, 2006; Abdulhay *et al.*, 2009)、图像处理(Long, 2001; Yue *et al.*, 2001; Nunes *et al.*, 2003a, 2003b, 2005; 刘忠轩和彭思龙, 2005)、气象学(Sinclair and Pegram, 2005)金融学(Huang *et al.*, 2003; Oladosu, 2009)等许多学科领域都有成功的应用. 近年来,已有些学者尝试将 EMD 的方法引入到物探资料的处理及异常的提取中(Battista *et al.*, 2007; Zhao and Yan, 2008; Huang *et al.*, 2010; 周文纳等, 2010),取得了很好

的效果.

本文尝试采用经验模态分解(EMD)方法来分解云南个旧地区重磁异常,并为提高分解的稳健性,提出了用双调和样条插值(BSI)进行包罗面插值的新方法.

1 二维经验模态分解

经验模态分解(EMD)认为,任何复杂的时间(空间)信号(数据)由从高频到低频的若干阶固有模态函数组成. 固有模态函数不同于傅里叶变换的正弦余弦函数或小波变换的小波函数,它不是简单预定的,而是根据具体的信号特征来确定的,因此,它具有强的自适应性. 固有模态函数需要满足以下两个条件(Huang *et al.*, 1998): (1)对整个时间信号来说,极值的个数与穿过零点的个数相同或相差为 1; (2)由局部极大值点形成的上包络线和局部极小值点形成的下包络线的平均值在任何一处均为零.

1.1 二维经验模态分解过程

Nunes *et al.* (2003b)在一维经验模态分解的基础上提出了二维经验模态分解的方法,原理与 Huang *et al.* (1998)提出的一维经验模态分解类似,但将一维经验模态分解中对线的筛分扩展为对面的筛分. 对于给定的任意二维信号 $s(x, y)$ ($x=1, 2, \dots, m; y=1, 2, \dots, n$),其筛分过程如下,算法流程如图 1 所示.

(1)初始化: $res_0(x, y) = s(x, y)$ (剩余值), $j=1$ (指示 IMF 的个数);

(2)提取第 j 个 IMF

①初始化: $f_0(x, y) = res_{j-1}(x, y)$, $i=1$;

②计算 $f_{i-1}(x, y)$ 的局部极大值和局部极小值;

③分别利用局部极大值和局部极小值进行插值计算,得到上、下包络面 $up_{i-1}(x, y)$ 和 $low_{i-1}(x, y)$;

④计算上、下包络面的均值 $mean_{i-1}(x, y) = \frac{up_{i-1}(x, y) + low_{i-1}(x, y)}{2}$;

⑤计算 $f_i(x, y) = f_{i-1}(x, y) - mean_{i-1}(x, y)$;

⑥计算停止准则 SD ;

⑦如果 $SD < \epsilon$ (ϵ 为阈值), $imf_j(x, y) = f_i(x, y)$; 否则, $i=i+1$, 并且重复②~⑥;

(3)计算剩余值 $res_j(x, y) = res_{j-1}(x, y) - imf_j(x, y)$;

(4) $j=j+1$, 重复步骤(2)(3)直到 $res_j(x, y)$ 的极值

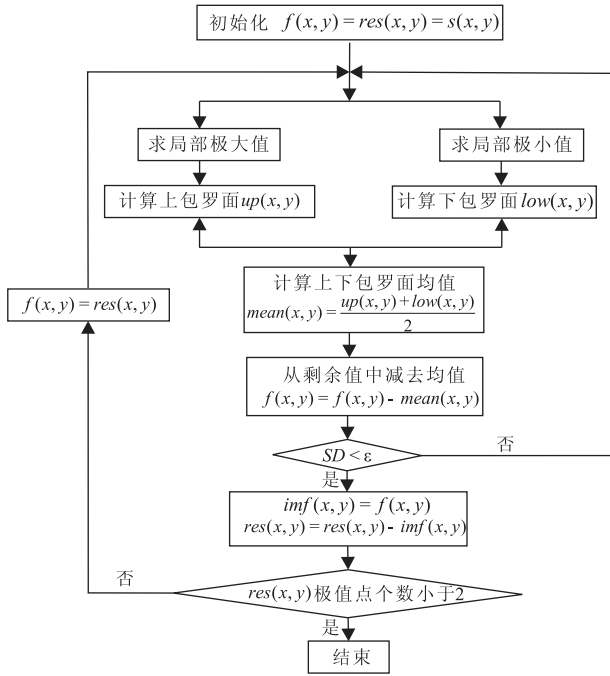


图 1 二维经验模态分解的算法流程

Fig. 1 BEMD sifting procedure

点个数少于 2,最终得到 BEMD 的分解结果.

1.2 包罗面插值方法

包罗面的插值计算,是 EMD 方法的关键内容之一,Huang *et al.* (1998)提出采用三次样条插值的方法来拟合非均匀取样的数据,Nunes *et al.* (2003b)在 BEMD 采用径向基函数对上下包罗面插值,但这两种方法都存在着一一定的缺陷,径向基函数插值需求解大型的线性方程组,计算量大,效率低(宋立新等,2008),而三次样条插值,虽然速度快、效率高,但是误差大、稳定性很差(Sandwell, 1987; 宋立新等,2008),尤其是对于极不平稳的数据,这一缺点更为明显.考虑到双调和样条插值(biharmonic spline interpolation,BSI)的方法(Sandwell, 1987),对地球物理数据的插值具有稳定性、灵活性、效率高等优点(Sandwell, 1987; 夏吉庄, 2010),本文对前人提出的二维经验模态分解方法进行了改进,在实现 BEMD 分解的过程中采用 BSI 方法插值来求解上下包罗面.作者曾分别用三次样条、双调和样条方法对不同实验数据进行了 EMD 分解计算,计算显示三次样条法有时不能得到分解结果,而双调和样条方法肯定有稳健的结果.

双调和样条插值原理如下(Sandwell, 1987; 夏吉庄, 2010):

对于空间上 N 个二维点数据 $p_i(x,y)(i=1,2,$

$\dots,N)$,双调和样条二维插值问题就转化为对方程(1)的求解:

$$\nabla^4 w[p(x,y)] = \sum_{j=1}^N a_j \delta[p(x,y) - p_j(x,y)],$$
$$w[p_i(x,y)] = w_i,$$
(1)

其中, ∇^4 为双调和算子, $\delta[p(x,y)]$ 为单位冲击函数, $p(x,y)$ 为二维空间上的一个位置, $w[p(x,y)]$ 表示位置 $p(x,y)$ 处的值.满足条件(1)的通解可表示为:

$$w[p(x,y)] = \sum_{j=1}^N a_j \varphi_m[p(x,y) - p_j(x,y)],$$
(2)

其中,要求系数 a_j 满足线性方程组:

$$w_i = \sum_{j=1}^N a_j \varphi_m[p_i(x,y) - p_j(x,y)],$$
(3)

其中,二维 Green 函数 $\varphi_m[p(x,y)] = |p(x,y)|^2 [\ln |p(x,y)| - 1]$.

1.3 终止准则

在 BEMD 分解的过程中,需要一个终止条件来判断是否已经筛分出一个二维固有模态函数(Bidimensional Intrinsic Mode Function, BIMF),按照 Huang *et al.* (1998)对经验模态函数的定义及其对一维 EMD 分解终止准则的定义,Nunes *et al.* (2003b)在实现 BEMD 分解的过程提出了如下终止准则:

$$SD_{ji} = \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n \frac{|f_{j(i-1)}(x,y) - f_{ji}(x,y)|^2}{f_{j(i-1)}(x,y)^2} < \epsilon,$$

ϵ 为阈值,为预先设定的一个较小的数. ϵ 的大小直接影响 BEMD 的分解过程, ϵ 设定越小,所分解出来的 BIMF 个数可能就越多,但分解过程消耗的时间会急剧增加.

2 研究区地质概况

云南个旧锡、铜多金属矿区地处云南省东南部,位居环太平洋成矿带与地中海—喜马拉雅成矿带的交汇处,是我国滇东南锡矿带上最重要的、规模最大的锡多金属矿集区之一.研究区地层发育较为齐全,从下元古界到新生界都有地层出露.区内岩浆活动频繁,自元古代至新生代各主要构造活动时期中,均有强度不等、类型不同的岩浆活动.区内岩浆岩普遍呈隐伏状态产出,出露面积小.区内地层按岩性大致可分为七大类:碳酸盐岩、泥沙质岩、花岗岩、酸性火山岩、基性—超基性火山岩、变质基底和第四系覆盖

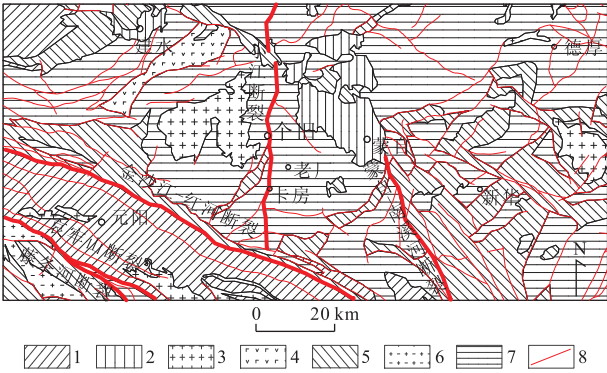


图 2 云南个旧锡铜多金属成矿区矿产地质略图

Fig. 2 Simplified geological map of Sn-Cu multi-metal mineralization district in Gejiu, Yunnan

1. 变质基底;2. 第四系;3. 花岗岩;4. 基性—超基性火山岩;5. 泥砂质岩;6. 酸性火山岩;7. 碳酸盐岩;8. 断层

物(图 2)。区内主要断裂构造有:北西向的藤条河断裂、哀牢山断裂、金沙江—红河断裂和近南北的小江断裂、蒙自—南溪河断裂(图 2)。

3 二维 EMD 方法在重磁异常分解中的应用

地质体的物性差异是物探工作有效性的根本前提。根据前人研究资料(熊光楚和石盛滕, 1994),个旧地区的岩矿石密度有以下特点:(1)第四系地表土与第三纪密度最低为 $1.90\sim2.07\text{ g/cm}^3$; (2)三叠系、二叠系、泥盆系主要为碳酸盐岩,平均密度 $2.70\sim2.80\text{ g/cm}^3$; (3)花岗质岩类平均密度比围岩低 $0.15\sim0.24\text{ g/cm}^3$; (4)锡矿石密度最大,达到 4.52 g/cm^3 ; (5)基性、超基性岩火山岩为 $3.0\sim3.1\text{ g/cm}^3$ 。由此可知个旧锡铜多金属矿区内,与成矿关系密切的岩浆岩(岩体)与其围岩存在较明显的密度差异,利用二维经验模态分解的方法,对该区的重力数据进行多尺度分解,有可能揭示与局部重力异常有关的各种隐伏岩体、构造以及与区域重力异常有关的基本构造格架。

对研究区重力数据(图 3)进行二维经验模态分解,得到四组重力异常数据,分别为第一级固有模态函数(IMF1)、第二级固有模态函数(IMF2)、第三级固有模态函数(IMF3)以及剩余分量(Residue)(图 4)。第一级固有模态函数 IMF1(图 4a)和第二级固有模态函数 IMF2(图 4b)分别表现为高频和次高频的局部重力异常,异常分布比较零散,强度和面积相对较小,其可能反映了岩体(包括隐伏岩体)、构造、

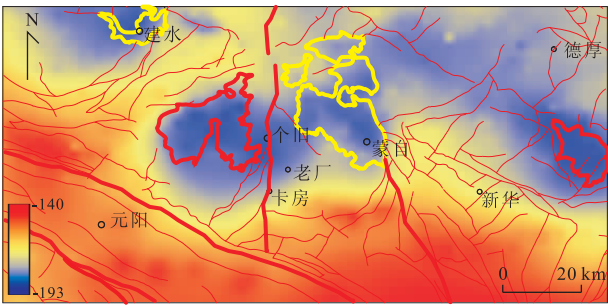


图 3 个旧地区原始重力数据($10^{-5}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)

Fig. 3 The original gravity data of Gejiu

甚至是矿床的存在及其产状变化等;第三级固有模态函数(IMF3)(图 4c)和剩余分量(Residue)(图 4c, 4d)代表低频部分的区域重力异常,异常分布集中,强度高、面积大,可能分别反映区域内岩性密度变化以及地层起伏变化。

对分解出来的固有模态函数(IMF1, IMF2 和 IMF3)以及剩余分量(Residue)进行重构,将第三级固有模态函数(IMF3)和剩余分量(Residue)相加作为区域重力异常(图 5a),将第一级固有模态函数(IMF1)和第二级固有模态函数(IMF2)相加作为区域局部重力异常(图 5b)。

由图 5a 可以看出,研究区区域异常整体表现为南高北低,这主要是因为研究区北侧主要分布碳酸盐岩、中酸性岩浆岩以及第四系等低密度地质体,而南侧主要分布有泥砂质以及元古代变质基底等高密度地质体(图 1)。区域内 2 个主要大岩体(个旧岩体与薄竹山岩体)表现出明显的重力负异常,同时也可以看出个旧岩体与薄竹山岩体分别向东南向和北西向侧伏,与实际地质情况吻合较好。在蒙自第四纪覆盖区也有一个重力异常低异常,按异常幅值推测由第四纪沉积盆地引起。图 5b 的局部重力异常,主要反映了岩体表面的起伏变化与其他局部岩性差异。

用同样的方法对研究区的航磁数据(图 6)进行二维经验模态分解,得到如图 7 所示的分解结果,共分解出 5 个经验模态分量与一个剩余量,直观比较图 7a~7e 的特征可发现异常的整体频率逐渐降低,并且相互之间有一定的正交性,为此笔者计算了各模态函数的相关系数(表 1),从中发现 IMF1~IMF5 之间的相关系数均很小,最大不超过 0.3。从图 7a,7b,7c 与断层的对应关系可以发现,IMF1 很好地反映了研究区的构造细节;IMF2、IMF3 清晰地反映了蒙自—南溪河断裂,其中 IMF2 也很好地反映出了该断裂以东的次一级断裂的形迹。

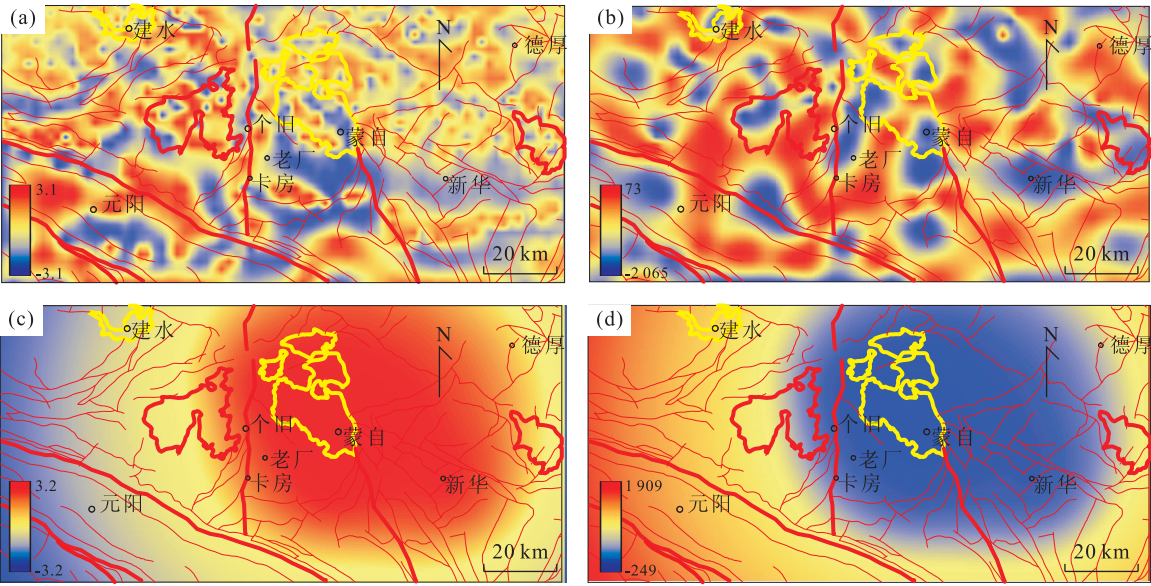


图 4 个旧地区重力数据二维经验模态分解结果
Fig. 4 BEMD results of gravity data in Gejiu
a. IMF1; b. IMF2; c. IMF3; d. 剩余分量(Residue)

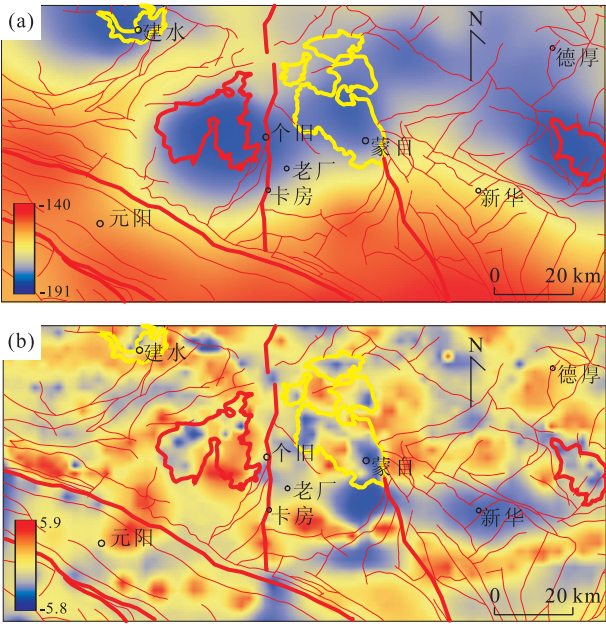


图 5 二维经验模态分解重构后显示的重力异常结果
Fig. 5 The gravity anomalies extracted by BEMD
a. IMF3+Residue; b. IMF1+IMF2

4 结论与探讨

通过研究二维 EMD 方法在云南个旧地区物重磁数据处理中的应用,证实了二维经验模态分解(BEMD)方法处理物探数据的可行性。在对个旧地区重磁探数据处理过程中发现:(1)基于双调和样条

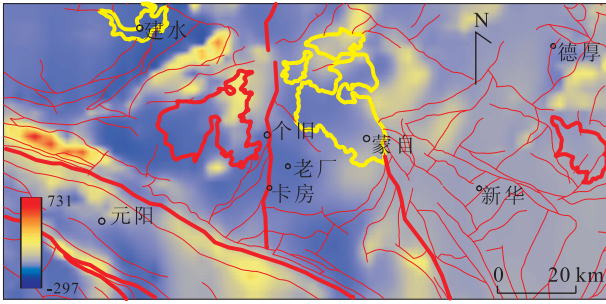


图 6 个旧地区航磁数据(nT)
Fig. 6 The aeromagnetic data of Gejiu

插值(BSI)的二维 EMD 分解方法对物探数据的处理,结果稳定性强,而且处理效果较三次样条插值要好;(2)经验模态分解对异常的分离,是基于重磁数据本身特点,具有很强的自适应性,因此能很好地保留原有信息的各种特征,对重磁异常的分解结果较好;(3)在实际的物探资料处理中,应当结合实际地质情况,可能需对二维经验模态分解结果进行合理重构以便更好地揭示局部和区域异常。

本文采用经验模态分解方法对云南个旧地区重磁异常进行了分离,虽然取得了一定的效果,但仍有许多更深层次的问题有待进一步研究:(1)重磁异常分解出的各个经验模态函数所反映的确切地质含义有待进一步剖析研究;局部异常与区域异常的重构准则也有待进一步量化。(2)经验模态函数的正交性问题,Huang *et al.* (1998)只是给出判断一维经验

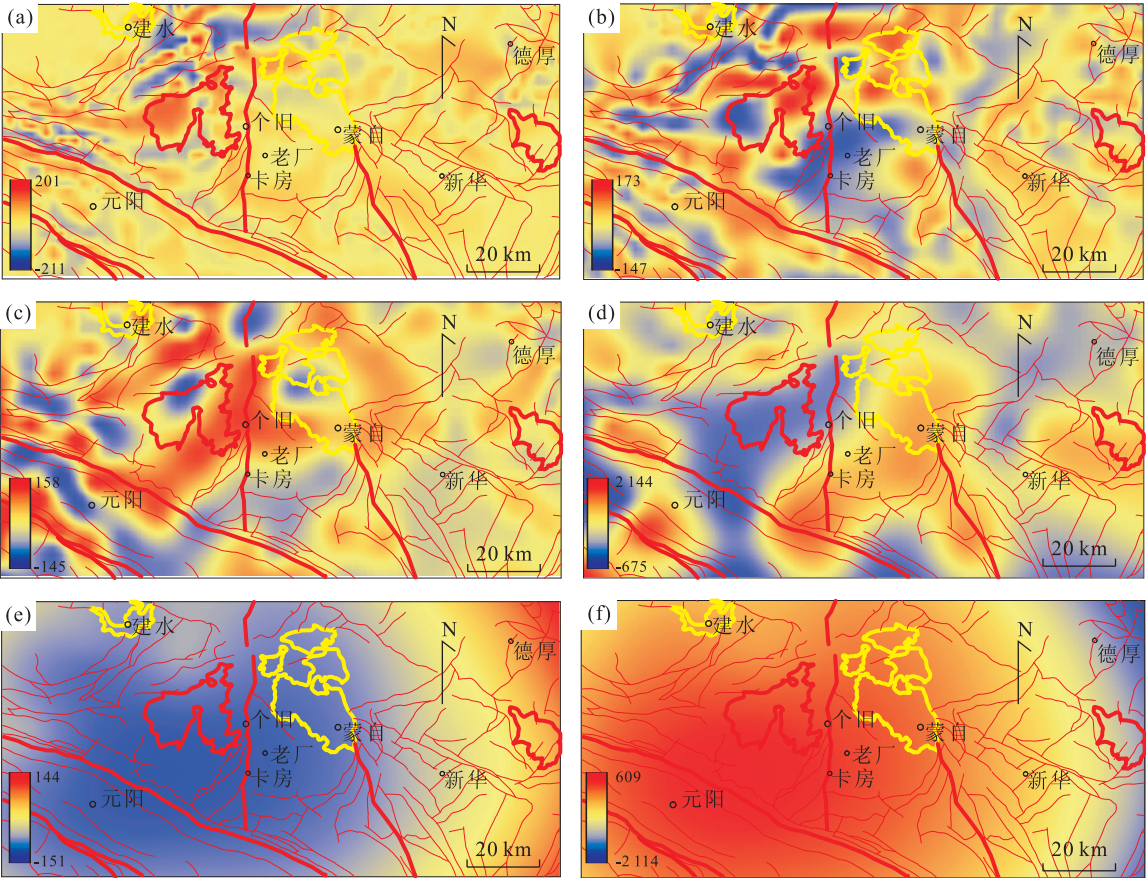


图 7 个旧地区航磁数据二维经验模态分解结果

Fig. 7 BEMD results of aeromagnetic data in Gejiu

a. IMF1; b. IMF2; c. IMF3; d. IMF4; e. IMF5; f. 剩余分量(Residue)

表 1 各模态函数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of IMFs

	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5	Residue
IMF1	1.000	-0.299	-0.131	-0.106	0.044	-0.044
IMF2	-0.299	1.000	-0.090	-0.136	0.057	-0.049
IMF3	-0.131	-0.090	1.000	-0.147	-0.099	0.077
IMF4	-0.106	-0.136	-0.147	1.000	0.003	-0.027
IMF5	0.044	0.057	-0.099	0.003	1.000	-0.993
Residue	-0.044	-0.049	0.077	-0.027	-0.993	1.000

模态函数的正交性的经验公式, Nunes *et al.* (2003b)在提出二维经验模态分解的方案时,并没有提到二维经验模态函数的正交性问题,而本文仅从相关分析角度进行了初步的探讨,因此对二维经验模态函数正交性问题尚需深入研究。

致谢:感谢云南省地质调查院提供文中所使用的重磁数据。

References

Abdulhay, E. , Gumery, P. Y. , Fontcave, J. , et al. , 2009.

Cardiogenic oscillations extraction in inductive plethysmography; ensemble empirical mode decomposition, Embe; 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, (1—20): 2240—2243.

Agarwal, V. , Tsoukalas, L. H. , 2007. Denoising electrical signal via empirical mode decomposition. 2007 Irep Symposium-Bulk Power System Dynamics and Control-Vii Revitalizing Operational Reliability, 1—2; 72—77.

Battista, B. M. , Knapp, C. , McGee, T. , et al. , 2007. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data. *Geophysics*, 72(2): H29—H37.

Chen, Q. H. , Huang, N. E. , Riemenschneider, S. , et al. , 2006. A B-spline approach for empirical mode decompositions. *Advances in Computational Mathematics*, 4(1—4): 171—195.

Chen, Z. J. , 2007. Multifractal theory based local singularity analysis method and its application in spatial information extraction for mineral exploration (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese

with English abstract).

- Cheng, Q. M., 1995. The perimeter-area fractal model and its application in geology. *Mathematical Geology*, 27(7): 64—77.
- Cheng, Q. M., 1999. Spatial and scaling modeling for geochemical anomaly separation. *Journal of Exploration Geochemistry*, 65(3): 175—194.
- Cheng, Q. M., 2001. Multifractal and geostatistic methods for characterizing local structure and singularity properties of exploration geochemical anomalies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(2): 161—166 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2003. Non-linear mineralization model and information processing methods for prediction of unconventional mineral resources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(4): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2004. A new model for quantifying anisotropic scale invariance and for decomposition of mixing patterns. *Mathematical Geology*, 36(3): 345—360.
- Cheng, Q. M., 2006. Singularity-generalized self-similarity-fractal spectrum (3S) models. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(3): 337—348 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2007. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 32(1—2): 314—324.
- Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, 40(5): 503—532.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., 2009. Singularity analysis of ore-mineral and toxic trace elements in stream sediments. *Computers & Geosciences*, 35(2): 234—244.
- Cheng, Q. M., Agterberg, F. P., Ballantyne, S. B., 1994. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*, 51(2): 109—130.
- Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Chen, J. G., et al., 2009. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: weak information extraction and mixing information decomposition. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 232—242 (in Chinese with English abstract).
- Echeverria, J. C., Crowe, J. A., Woolfson, M. S., et al., 2001. Application of empirical mode decomposition to heart rate variability analysis. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 39(4): 471—479.
- Gong, Z. Q., Zou, M. W., Gao, X. Q., et al., 2005. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series. *Acta Physica Sinica*, 54(8): 3947—3957.
- Heslop, D., Dobeneck, T. V., Höcker, M., 2007. Using non-negative matrix factorization in the “unmixing” of diffuse reflectance spectra. *Marine Geology*, 241(1—4): 63—78.
- Huang, J. N., Zhao, B. B., Chen, Y. Q., et al., 2010. Bidimensional empirical mode decomposition (BEMD) for extraction of gravity anomalies associated with gold mineralization in the Tongshi gold field, western Shandong uplifted block, eastern China. *Computers & Geosciences*, 36(7): 987—995.
- Huang, N. E., 2000. The age of large amplitude coastal seiches on the Caribbean coast of Puerto Rico. *Physical Oceanography*, 30(8): 405—409.
- Huang, N. E., 2006. Beyond the Fourier transform: coping with nonlinear, nonstationary time series. NASA Goddard Space Flight Center, USA, 28. <http://www.physiconet.org/events/hrv-2006/huang.pdf> (accessed 26 May, 2006).
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., 1999. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31: 417—457.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., et al., 1998. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 454(1971): 903—995.
- Huang, N. E., Wu, M. L., Q., W. D., et al., 2003. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 19: 245—268.
- Li, Q. M., Cheng, Q. M., 2004. Fractal singular value (Egin-value) decomposition method for geophysical and geochemical anomaly reconstruction. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(1): 109—118 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. X., Peng, S. L., 2005. Directional empirical mode decomposition and its application in texture segmentation. *Science in China (Ser. E)*, 35(2): 113—123 (in Chinese).
- Long, S. R., 2001. Use of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform in image analysis. *World*

- Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, (Xvii): 67—71.
- Nunes, J. C., Bouaoune, Y., Delechelle, E., et al., 2003a. Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition. *Image and Vision Computing*, 21(12): 1019—1026.
- Nunes, J. C., Niang, O., Bouaoune, Y., et al., 2003b. Bidimensional empirical mode decomposition modified for texture analysis. *Image Analysis, Proceedings*, 2749: 171—177.
- Nunes, J. C., Guyot, S., Delechelle, E., 2005. Texture analysis based on local analysis of the bidimensional empirical mode decomposition. *Machine Vision and Applications*, 16(3): 177—188.
- Oladosu, G., 2009. Identifying the oil price-macroeconomy relationship; an empirical mode decomposition analysis of US data. *Energy Policy*, 37(12): 5417—5426.
- Pines, D., Salvino, L., 2002. Health monitoring of one dimensional structures using empirical mode decomposition and the Hilbert-Huang transform. *Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems*, 4701: 127—143.
- Pines, D., Salvino, L., 2006. Structural health monitoring using empirical mode decomposition and the Hilbert phase. *Journal of Sound and Vibration*, 294(1—2): 97—124.
- Sandwell, D. T., 1987. Biharmonic spline interpolation of geos-3 and seasat altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 14(2): 139—142.
- Sinclair, S., Pegram, G. G. S., 2005. Empirical mode decomposition in 2-D space and time: a tool for space-time rainfall analysis and nowcasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 9(3): 127—137.
- Song, L. X., Gao, F. J., Xi, Z. H., 2008. Compared and improved research of bidimensional empirical mode decomposition method. *Journal of Electronics & Information Technology*, 30(12): 2890—2893 (in Chinese with English abstract).
- Su, S., Mcardle, B. H., Rodgers, K. A., et al., 2003. Wavelet analysis of variations in geochemical and microfossil data across the Cretaceous/Tertiary boundary at Flaxbourne River, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 46(2): 199—208.
- Vincent, H. T., Hu, S. L. J., Hou, Z., 1999. Damage detection using empirical mode decomposition method and a comparison with wavelet analysis. *Structural Health Monitoring*, 2000: 891—900.
- Xia, J. Z., 2010. An application of biharmonic spline interpolation to integration of logging and seismic data. *Oil & Gas Geology*, 31(2): 244—249 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, F., Chen, J. G., 2007. Two mixed total screening MATLAB program based on normal probability paper principle. *Proceedings of the IAMG'07: Geomathematics and GIS Analysis of Resources, Environment and Hazards*, 2007: 464—468.
- Xiong, G. C., Shi, S. T., 1994. Physico-geologic model of the Gejiu tin district and its application. *Geological Review*, 40(01): 19—27 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. X., Tavner, P. J., 2009. Empirical mode decomposition, an adaptive approach for interpreting shaft vibratory signals of large rotating machinery. *Journal of Sound and Vibration*, 321(3—5): 1144—1170.
- Yue, H. Y., Guo, H. D., Han, C. M., et al., 2001. A SAR interferogram filter based on the empirical mode decomposition method. *Igarss 2001: Scanning the Present and Resolving the Future*, (1—7): 2061—2063.
- Zhang, L. P., Ruan, T. J., 2000. Application of wavelet analysis to interference elimination for geochemical hydrocarbon exploration. *Journal of China University of Geosciences*, 11(1): 89—91.
- Zhao, P. D., 1982. On the mathematical characteristics of geological bodies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1: 145—155 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., 2002. “Three-component” quantitative resource prediction and assessments: theory and practice of digital mineral prospecting. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 482—489 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P. D., Hu, W. L., Li, Z. J., 1994. Statistical prediction of mineral deposit. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, P. D., Meng, X. G., 1992. Quantification and geosciences. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 17: 51—56 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. T., Yan, J. C., 2008. Filtering of electrochemical transients by empirical mode decomposition method. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 24(1): 85—90.
- Zhou, W. N., Zeng, Z. F., Du, X. J., 2010. Gravity anomaly separation based on empirical mode decomposition. *Global Geology*, 29(3): 495—502 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈志军,2007. 多重分形局部奇异性分析方法在及其在矿产资源信息提取中的应用(博士学位论文). 武汉:中国地质大学.

成秋明,2001. 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. 地球科学——中国地质大学学报,26(2):161—166.

成秋明,2003. 非线性矿床模型与非常规矿产资源评价. 地球科学——中国地质大学学报,28(4): 445—454.

成秋明,2006. 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. 地球科学——中国地质大学学报,31(3):337—348.

成秋明,赵鹏大,陈建国,等,2009. 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. 地球科学——中国地质大学学报,34(2): 232—242.

李庆谋,成秋明,2004. 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. 地球科学——中国地质大学学报,29(1):109—118.

刘忠轩,彭思龙,2005. 方向 EMD 分解与其在纹理分割中的应用. 中国科学(E 辑),35(2):113—123.

宋立新,高凤娇,郝朝晖,2008. 二维 EMD 分解方法的比较与改进. 电子与信息学报,30(12): 2890—2893.

夏吉庄,2010. 双调和样条内插方法在测井和地震资料整合中的应用. 石油与天然地质,31(2): 244—249.

熊光楚,石盛滕,1994. 个旧锡矿区物理—地质模型及应用效果. 地质论评,40(01):19—27.

赵鹏大,1982. 试论地质体的数学特征. 地球科学——中国地质大学学报,1:145—155.

赵鹏大,2002. “三联式”资源定量预测与评价——数字找矿理论与实践探讨. 地球科学——中国地质大学学报,27(5):482—489.

赵鹏大,胡旺亮,李紫金,1994. 矿床统计预测. 北京:地质出版社.

赵鹏大,孟宪国. 1992. 地质学的量化问题. 地球科学——中国地质大学学报,17:51—56.

周文纳,曾昭发,杜晓娟等,2010. 基于经验模态分解的重力异常分离. 世界地质,29(3):495—502.

《地球科学——中国地质大学学报》
2011 年 第 36 卷 第 3 期 要目预告

太行山南段西安里早白垩世角闪辉长岩的成因:锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和岩石地球化学证据	王春光等
饱和软土地基中 PHC 群桩贯入过程的能量耗散模型	刘 镇等
根据构造脊和地球化学指标综合研究油气运移路径	蒋有录等
辽西低凸起与辽中凹陷油气成藏期次的异同	姜 雪等
黔西滇东地区早三叠世早期植物化石研究的新进展	陈建华等
烃源岩非均质性对有机质生烃动力学参数影响及评价	王 民等
巴颜喀拉构造带二叠—三叠纪岩相特征及构造演化	陈守建等
鄂西晚泥盆世含磷鲕状铁矿石中磷的赋存状态与形成	柴辛娜等
华北克拉通东部及苏鲁造山带的地壳生长:来自现代河流碎屑锆石的 U-Pb 定年和 Hf 同位素证据	耿显雷等
纳米微粒多重分数维准晶结构模型一种新型的金属纳米材料	陈 斌等