文章编号:1009-3850(2012)04-0100-06

# 云南北衙铁金矿区小波多尺度分析综合解释方法应用效果

# 曾琴琴,王永华,杨 剑

#### (成都地质矿产研究所,四川 成都 610081)

摘要:通过模型磁异常分解 结合功率谱分析及异常振幅计算场源深度并判断场源分布平面位置 ,表明小波多尺度 分析在位场分离中的有效性。将该方法应用于北衙铁金矿区磁异常分析解释 ,通过功率谱分析估算了各阶细节及 四阶逼近的场源深度 结合不同深度异常振幅推断了磁源空间展布关系特征。分析表明 ,区内北部和西部强磁异常 主要由矿体引起 ,且矿体在中深部产状发生改变;而东部大范围磁异常区主要为二叠系玄武岩所致。

关 键 词: 小波多尺度分析; 功率谱分析; 异常分离; 北衙铁金矿区

中图分类号: P631.1 文献标识码: A

地球深部结构的研究一直依赖于地球物理方 法的应用。重磁场资料是研究地质构造及岩石圈 结构的重要基础<sup>[1]</sup>。由于地面观测异常是由不同 深度、不同物性、规模及形态的地质对象所产生的 场的叠加,因此,采用适当的数据处理方法,合理地 对重磁场进行分离,是分析和解释地下场源的关键 步骤。

目前,位场分离的方法有解析延拓法、频率域 滤波法等,这些方法一般只针对横向或纵向分离, 且多数是基于傅里叶变换的,具有一定的局限性。 小波分析是20世纪90年代发展起来的应用数学分 析工具,它是在傅里叶变换和 Gabor 变换基础上发 展起来的多尺度时频分析工具,具有良好的局部分 析功能<sup>[2]</sup>。小波分析的多尺度分辨能力也被应用 于重磁数据滤波、弱信号分析等<sup>[3~5]</sup>,并取得了大量 的研究成果<sup>[6~8]</sup>。本文应用小波多尺度分析分离不 同深度场源异常,并结合各深度异常振幅分析场源 分布特征。

### 方法原理

 $⊕ \psi(t) \in L^2(R) L^2(R)$  表示定义在 R 上的可

测且平方可积的函数集合,它的 Fourier 变换为  $\hat{\psi}(\omega)$ 。若 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足可容许性条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

则称函数  $\psi(t)$  为一个基本小波或母小波。将母函数  $\psi(t)$  经伸缩和平移后得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \ a \ b \in R \ a \neq 0$$

式中  $\psi_{a,b}(t)$  为由母小波  $\psi(t)$  生成的依赖于 参数 a 和 b 的连续小波; a 称为尺度因子 ,b 称为平 移因子。对母小波  $\psi(t)$  经伸缩和平移后 ,就得到一 系列小波序列  $\psi_{a,b}(t)$ 。尺度因子 a 的变化 ,表现为  $\psi_{a,b}(t)$  相对于母小波的伸缩; 平移因子 b 的变化表 现为  $\psi_{a,b}(t)$  相对于母小波的平移。

对于任意函数 *f*(*t*) € *L*<sup>2</sup>(*R*) ,定义其小波变 换为<sup>[9~11]</sup>

$$W_{f}(a \ b) = \langle f \ \bar{\psi}_{a \ b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \ \bar{\psi}(\frac{t-b}{a}) \ dt$$
(1)

式中,< $f \bar{\psi}_{ab}$ >表示内积; $\bar{\psi}_{ab}$ 为 $\psi_{ab}$ (t)的共 轭。其小波逆变换为

收稿日期: 2012-07-25; 改回日期: 2012-09-30

作者简介: 曾琴琴(1982 – ),女,博士,主要从事地球物理数据处理及方法技术研究。E-mail: 162039179@ qq. com 资助项目: 北衙金矿远景区深部调查评价(项目编号: 1212011220249)

$$f(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a \ b) \ \psi(\frac{t-b}{a}) \ dadb \ (2)$$

利用小波多尺度分析可以把一个信号 f(t) 分 解为逼近部分和细节部分,即  $f(t) = A_j + \sum_{j=1}^{J} D_j$ ,其 中, Ai 是逼近部分, Di 细节部分。图 1 为三层多尺 度分析结构图 S 是信号, A1、A2、A3 为小波分解后 的逼近, D1、D2、D3 为细节部分。



图 1 三阶小波分析结构图

Fig. 1 Technological processes for the third-order wavelet analysis

将图 1 多尺度分析方法应用于磁测资料处理, 野外观测值  $\Delta T$  经一阶小波分解,得到的细节部分 作为局部场  $\Delta T_{\beta_1}$ ,而一阶逼近作为区域场  $\Delta T_{\Sigma_1}$ ;对 继续小波分解,则可得  $\Delta T_{\beta_2}$ 和  $\Delta T_{\Sigma_2}$ ;对  $\Delta T_{\Sigma_2}$ 继续 小波分解,可得  $\Delta T_{\beta_3}$ 和  $\Delta T_{\Sigma_3}$ ,……。分解阶数要根 据异常的特征和地质情况来决定。若分解到三阶 时  $\Delta T_{\Sigma_3}$ 异常最多显示一个局部异常特征,则最后  $\Delta T$  可表示为:

 $\Delta T = \Delta T_{\equiv \text{might}} + \Delta T_{\equiv \text{might}} + \Delta T_{\perp \text{might}} + \Delta T_{-\text{might}}$ 

小波变换是重磁异常分解的有效工具,利用小 波多尺度分析方法,可以将重磁异常分解到不同尺 度空间,其反映了不同地质体的规模和埋深。作为 一种新而有效的位场分离方法,小波多尺度分析方 法为重磁资料解释和研究地壳提供了新的思路,在 国内外得到了广泛的应用。

### 2 理论模型

已知地磁倾角为 30°,理论模型由两个有限延 伸棱柱体组成。其中,第一个棱柱体中心坐标为, 各方向的延伸长度分别为 100、200 和 60m,磁化强 度为 5000 × 10<sup>3</sup> A/m; 第二个棱柱体中心坐标为,各 方向的延伸长度分别为 200、100 和 200m,磁化强度 为 20000 × 10<sup>3</sup> A/m。图 2a 为这 2 个棱柱体叠加的 △T 磁异常平面图,可见,该异常由两个正负伴生的 磁异常组成,其中,南部磁异常幅值大,衰减快,表 现为浅源场特征;北部异常幅值小,范围大,衰减

慢 表现为深源场特征。将该磁异常进行小波变 换 分解到四阶逼近时(如图 2b) 异常场较为简单, 表现区域场特征,经功率谱分析,此时对应的场源 似深度为 424m,其基本能反映深源场的深度。图 2c 为小波分析一阶细节与二阶细节的和,功率谱分 析该异常场源似深度约为 74m(与第一个模型上顶 深度 70m 较为接近) 因此 其主要反映埋深较浅的 那个棱柱体产生异常;图 2d 为该异常对应的振幅 (图中红色虚线框表示棱柱体平面位置),可见,振 幅较强的位置与该模型棱柱体对应性较好:图 2e 为 图 2a 中磁异常小波三阶细节与四阶细节的和 ,与图 2a 形态相似 此时异常也为两个正负伴生的磁异常 组成,不同的是,异常关系较为清晰,异常幅值小, 经功率谱分析该异常对应的场源似深度为 215m(实 际模型上顶平均深度为235m) 因此,该异常为两个 不同深度棱柱体的异常平均场;图 2f 为图 2e 中异 常的振幅(图中两个虚线边框分别表示两个模型棱 柱体平面位置),可见,两个强振幅位置与模型位置 具有一定的对应性。

通过以上模型分析结果可知,基于小波多尺度 分析方法能有效分离不同深度的异常场。

## 3 应用实例

北衙铁金矿区位于云南省大理州鹤庆县北衙 乡 大地构造上位于扬子板块的西部边缘 区域性 NW 向金沙江-哀牢山深大断裂、近 SN 向的永胜-程 海断裂带和 NE 向德丽江断裂带分别在矿区的南、 西北和东部通过<sup>[12]</sup>。区内发育志留系、泥盆系、二 叠系、三叠系、新生界始新统及上新统和第四纪地 层。以三叠系最为发育,早古生代地层仅见于研究 区的西北角,且零星出露。其南部及东南部大面积 出露峨眉山玄武岩,另见面积较大的古近纪斑岩 (石英斑岩、正长斑岩)侵入到峨眉山玄武岩和三叠 纪地层中,沿接触带夕卡岩化、大理岩化、角岩化、 褐铁矿化发育,并有少量的基性、超基性脉岩侵入 到三叠系中。矿区铁金矿体围岩为三叠系中统北 衙组(T2b)不纯碳酸盐岩,该套地层中矿化元素含 量普遍较高,受岩浆后期含矿热液作用,地层普遍 产生热变质及交代蚀变形成大理岩、矽卡岩及含金 的磁铁矿---硫化物矿体(原生矿石),与围岩有一定 的磁性差异,为磁法找矿提供前提条件。

图 3 为北衙铁金矿区△T 磁异常平面图,区内 强磁异常主要分布于南部和东部,且异常较为规则,呈南正北负的分布特征。



图 2 理论模型小波分析结果

a. 模型正演△T异常; b. 小波四阶逼近; c. 小波一阶 + 二阶细节; d. 图 c 中异常振幅; e. 小波三 + 四阶细节; f. 图 e 中异常振幅

Fig. 2 Wavelet analytical results based on the theoretical models

a. Forward  $\triangle T$  magnetic anomalies of the models; b. 4th-order wavelet approximation; c. 1st-and 2nd-order wavelet details; d. Abnormal amplitudes in Fig. 2c; e. 3rd- and 4th-order wavelet details; f. Abnormal amplitudes in Fig. 2e



图 3 北衙铁金矿区△T磁异常平面图

Fig. 3 Planar distribution of the  $\triangle T$  magnetic anomalies in the Beiya iron-gold mining district





图 4 北衙铁金矿区磁异常小波多尺度分析结果 a. 小波一阶细节; b. 小波二阶细节; c. 小波三阶细节; d. 小波 四阶细节; e. 小波四阶逼近

Fig. 4 Multi-scale wavelet analytical results of the magnetic anomalies in the Beiya iron-gold mining district

a. 1st-order wavelet details; b. 2nd-order wavelet details; c. 3rd-order wavelet details; d. 4th-order wavelet details; e. 4th-order wavelet approximation

图 4 为利用小波多尺度分解图 3 中磁异常结 果。其中 小波一阶细节经功率谱分析场源似深度 为 56m, 现有钻孔资料证实, 在该异常深度 50~ 200m 段钻遇主矿体,最大厚度达71m;小波二阶细 节显示 区内多数异常呈北西或北西西走向,异常 呈等轴状 衰减速度较为均匀,表明场源近于垂直, HNT 异常相对于其它异常而言,其强度较弱,且幅 值衰减较为缓慢,表明该异常对应的场源相对要 深,经功率谱分析,小波二阶细节场源似深度为 260m。钻孔显示 在 HNT 异常上 300m 深度范围内 见矿,矿体厚度达40m;小波三阶细节显示,区内磁 异常主要呈两个条带,其中,西部条带主要由 HNT 及 TKT 西磁异常组成,异常呈等轴状,分布范围较 大,HNT 异常东陡西缓,表明场源向西倾斜,经功率 谱分析对应场源似深度 552m; 小波四阶细节中, TKT 西磁异常较弱,进一步表明该异常由中浅部磁 源引起,HNT-JGB及TKT 东异常范围增大,说明该 对应场源深部可能有一定的延深,经功率谱分析场 源似深度为990m;小波四阶逼近显示,区域场由北 西到南东,呈现由弱增强的基底梯度带特征,功率 谱分析场源似深度为1867m。



图 5 小波各尺度异常振幅分层图



图 5 为图 4 中小波各尺度异常对应的振幅分层 图 ,其大致反映磁源空间分布特征。区内东部磁异 常在 990 ~ 1867m 延展特征相似 ,说明该异常具有 深部根基 ,由此进一步证实该处地表观测异常为二 叠系玄武岩所致; TKT 西磁异常主要分布在 552m 以浅 ,且轴向呈南北向 ,而 HNT-JGB 磁异常在 990m 以浅有一定延深 ,对应浅部场源近乎直立 ,异常轴 向为 ,深部向西倾 ,异常轴向为近北西向。

#### 4 结论

在利用小波多尺度分析分解磁异常时,分解阶 数要根据异常场特征确定,而对分解结果的解释则 需结合地质资料。在多种地球物理方法联合使用 的情况下,解释的精度可以得到提高。通过对北衙 铁金矿区磁异常的分解,得到不同深度场磁异常分 布特征,并根据功率谱分析及异常振幅推断磁源深 度及空间展布特征,为矿区深部勘探研究提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 刁博,王家林 程顺有.塔里木盆地东部重力异常离散小波多 分辨分析[J].同济大学学报(自然科学版) 2008 36(4):555 -559.
- [2] 刘贵忠 邸双亮.小波分析及其应用[M].西安:西安科技大学 出版社,1992.
- [3] 侯遵泽 杨文采.中国重力异常的小波多尺度分析[J].地球物 理学报,1997 40(1):85-95.
- [4] 李宗杰.小波变换在位场数据处理中的应用[J].石油物探, 1997,36(2):86-93.
- [5] 耿喜哲,刘天佑.小波分析在高精度磁测数据处理上的应用[J].石油物探 2000 39(4):121-124.
- [6] 侯遵泽 杨文采.小波分析应用研究[J].物探化探计算技术, 1995,17:1-9.
- [7] 侯遵泽 杨文采.小波变换与地球物理数值分析[A].中国地 球物理学会年刊[C].北京:石油工业出版社,1995.
- [8] DAUBECHIES I, Orthonormal bases of Compactly Supported Wavelets [J]. Communications on Pure and Applied Math. ,XLI ,1998 ,909 - 996.
- [9] TORRENCE C ,COMPO G. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bull Amer Met Soc ,1998 ,79:61 78.
- [10] JONGHOOM CHUN. Nonlinear filering using the wavelet transform[J]. Signal Processing 2000 (80):441-450.
- [11] 李世雄,刘家琦.小波变换与反演数学基础[M].北京:地质 出版社,1994.
- [12] 葛良胜,郭晓东,邹依林,等.云南北衙金矿床地质特征及成 因研究[J].地质找矿论丛 2002,17(1):32-41.

#### ZENG Qin-qin , WANG Yong-hua , YANG Jian

( Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

Abstract: The calculation of the depths of field sources and the determination of the planar distribution of field sources based on the model for the decomposition of magnetic anomalies, power spectrum analysis and abnormal amplitudes indicate the effectiveness of multi-scale wavelet analytical method on potential field separation. In this paper, the method is applied to analyze and interpret the magnetic anomalies in the Beiya iron-gold mining district, Heqing, Yunnan. The emphasis is placed on the calculation of the depths of field sources of each order details and 4th-order approximation on the basis of power spectrum analysis, and the determination of spatial distribution of magnetic sources inferred from the abnormal amplitudes at varying depths. The results in this study show that the orebodies are responsible for highly magnetic anomalies in the northern and western parts of the Beiya iron-gold mining district, and display the modification in occurrence at the medium-deep parts of it. The wide ranges of magnetic anomalies in the eastern part of it are caused by the Permian basalts. The results outlined above may inspire some new approaches to the further deep-seated exploration and development in the study area.

Key words: multi-scale wavelet analysis; power spectrum analysis; separation of anomalies; Beiya iron-gold mining district