

# 基于小波分析的磁测数据处理流程及解释方法

张恒磊, 刘天佑

(中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**对某地区高精度磁测数据, 为了有效分析地下场源的异常特征, 作者采用小波分析方法对磁异常进行多尺度分析, 获取不同深度层次的场源信息, 结合平面、剖面资料的反演处理解释, 利用2.5维模型反演建立了地下场源的地球物理模型。通过分析, 认为小波多尺度分析可以更好的揭示深部场源的赋存信息, 计算精度可靠, 较传统的延拓、滤波等方法有更高的分辨率。

**关键词:**磁法勘探; 小波分析; 二度半模型反演; 匹配滤波

**中图分类号:** P631.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2009)06-0686-05

近几十年来, 小波多尺度分析方法在地球物理信号处理领域得到了广泛的应用<sup>[1-6]</sup>, 这主要得益于小波的时频局域分析能力。小波多尺度分解能将重磁异常精细地分解到多个不同的尺度上来反映不同尺度和深度的异常, 常被用于区域重磁场的分解和分析, 能得到较好的效果<sup>[2-3]</sup>。为此, 我们采用小波多尺度分解方法, 把实测磁异常分解为几个不同阶的细节, 并用谱分析<sup>[7]</sup>方法计算它们所代表的场源深度, 以此来分析深部是否还有未发现的铁矿体。

笔者通过实例分析小波多尺度变换的理论与应用效果, 并传统延拓方法进行比较, 认为小波多尺度分析可以更好地揭示深部场源的赋存信息, 计算精度可靠。此外通过采用多种反演算法, 以及充分结合地质资料进行二度半反演, 可以有效地了解地下异常体的地质地球物理模型。笔者通过分析总结, 并结合中国地质大学(武汉)研发的MAGS磁法勘探软件系统, 给出了一套简单实用的野外资料处理流程, 希望有助于野外磁法勘探的数据处理工作, 在磁法勘探热潮中起到更广泛积极的作用。

## 1 方法原理

笔者主要对小波变换和匹配滤波算法原理作简单的介绍。

### 1.1 小波多尺度变换

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中, 尺度大小决定了重磁异常所反映的地质

体规模和埋深的大小。作为一种新而有效的位场分离方法, 小波多尺度分析为解释和研究地质体引起的重磁异常提供了新的思路。该方法在国内外已得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

连续小波变换(continuous wavelet transform, CWT)亦称积分小波变换(integral wavelet transform, IWT), 定义为

$$\psi_{\text{CWT}}(t) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

设定

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (2)$$

$$a \in \mathbb{R}, a \neq 0, b \in \mathbb{R}.$$

则称函数系 $\psi_{a,b}(t)$ 为小波函数(wavelet function)或简称为小波(wavelet), 它是由函数 $\psi(t)$ 经过不同的时间尺度伸缩(time scale dilation)和不同的时间平移(time translation)得到的。式(2)中: $\mathbb{R}$ 表示实数域, 因此, $\psi(t)$ 是小波原型(wavelet prototype), 并称为母小波(mother wavelet)或基本小波(basic wavelet);  $a$ 是时间轴尺度伸缩参数, 大的 $a$ 值对应于小的尺度, 相应地, 小波 $\psi_{a,b}(t)$ 伸展较宽, 反之, 小的 $a$ 值对应的小波在时间轴上受到压缩。

把小波多尺度分析方法应用于磁法勘探资料处理, 野外观测值 $\Delta T$ 经一阶小波分解, 得到局部场 $\Delta T_{\text{一阶细节}}$ 和区域场 $\Delta T_{\text{一阶逼近}}$ ,  $\Delta T_{\text{一阶逼近}}$ 作二阶小波分解, 得到 $\Delta T_{\text{二阶细节}}$ 和 $\Delta T_{\text{二阶逼近}}$ , 再把 $\Delta T_{\text{二阶逼近}}$ 作三阶小波分解, 得到 $\Delta T_{\text{三阶细节}}$ 和 $\Delta T_{\text{三阶逼近}}$ , ……如此分

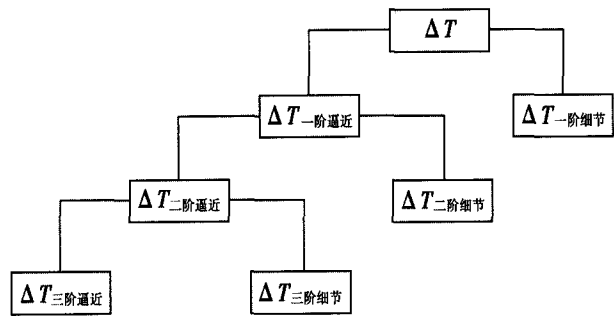


图1 小波多尺度分解示意

解下去(图1)。

1.2 功率谱分析确定场源似深度

由小波多尺度分析得到的磁异常各阶细节和逼近,可以计算出引起该磁异常的场源似深度,在本区可以认为是地下磁异常体的似深度。利用重磁位场的泊松公式,得出磁异常  $\Delta T$  的频谱表达式为<sup>[7-9]</sup>:

$$S_{\Delta T} = 2\pi M [i(u\alpha + v\beta) + \gamma \sqrt{u^2 + v^2}] e^{-sh}, \quad (3)$$
其中,  $M$  磁化强度,  $u$  和  $v$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向的径向波数,  $\alpha, \beta, \gamma$  为磁场  $T$  的方向余弦,  $h$  为场源的

中心埋深,  $s = \sqrt{u^2 + v^2}$ 。由式(3)可以得到场源磁场的振幅谱:

$$A(s) = 2\pi M [s^2 - (ul + vm)^2]^{1/2} e^{-sh}, \quad (4)$$
两边取对数可得:

$$\ln A(s) = \frac{1}{2} \ln \pi M [s^2 - (ul + vm)^2]^{1/2} - sh. \quad (5)$$

由式(5)可知,采用傅里叶变换求实测磁异常在不同的径向波数情况的功率谱,并根据对数功率谱曲线  $\ln A(s)-s$ ,采用最小二乘拟合可以求得场源的似深度  $h$ 。

2 磁测资料处理流程

笔者根据多年的磁法勘探工作经验,总结了一套针对固体矿产勘探的磁测数据处理流程(图2)。利用小波多尺度分解分离深部弱磁信号,提取不同深度场源信息;采用多种反演算法对异常进行反演解释,综合多种方法的反演计算可以加强物探工作者对异常的认识,约束反演多解性,提高反演结果的客观性。最后结合区域成矿模式、地质资料及钻井

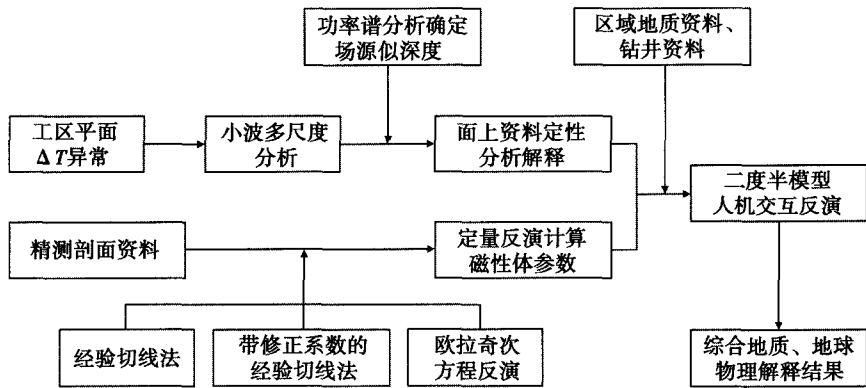


图2  $\Delta T$  异常常规处理解释流程

资料等先验信息,利用二度半人机交互反演方法较细致地计算出引起异常的地质体的相关参数,建立工区的地球物理模型,最终对异常给出确定的地质地球物理综合解释结果。

笔者以内蒙某地区的磁异常为例来说明方法的应用效果。区内围岩(大理岩、灰岩)一般磁性较弱,不会产生较强的磁异常,而矿化矽卡岩及矿化大理岩磁性较强,能产生较强的异常响应,成为区内找矿的主要干扰源。根据区域航磁异常资料,布设地面高精度磁测工作,异常形态为椭圆形,长轴方向近东西,异常等值线圈闭长约1 km,宽约0.7 km,极大值为3 443 nT。图3为地面高精度磁测结果,可以看出,研究区西侧为大面积的正异常,起伏较剧烈;而东侧为相对平静的负异常。对  $\Delta T$  异常进行向上延拓处理,取上延高度为50、100、150、200 m(图4)。

从上延结果看,异常形态规则,正异常呈东西拉长椭圆状,北部有与正异常伴生的负异常,异常强度极大值为3 443 nT,上延200 m后衰减为428.4 nT,表明该异常是有一定埋深和规模的磁性体。异常的东侧为大面积的负异常,推测是不具磁性的沉积岩或弱磁性的变质岩。

在磁法勘探工作中,由于深部场源的磁异常响应频率较低,幅值不大,又受到上覆盖层中高频磁异常的干扰,导致推断解释存在诸多困难。有时即使能够识别和分辨,对其空间分布状态也无从作出判断。有时虽然可以定性的对异常作出解释,但对其下延深度及赋存状态却不得而知。为了解决这些问题很多地球物理工作者曾尝试利用延拓和滤波等方法进行处理,而采用向上延拓和低通滤波虽然能够突出和反映深部构造的异常,但上层的磁场或多或

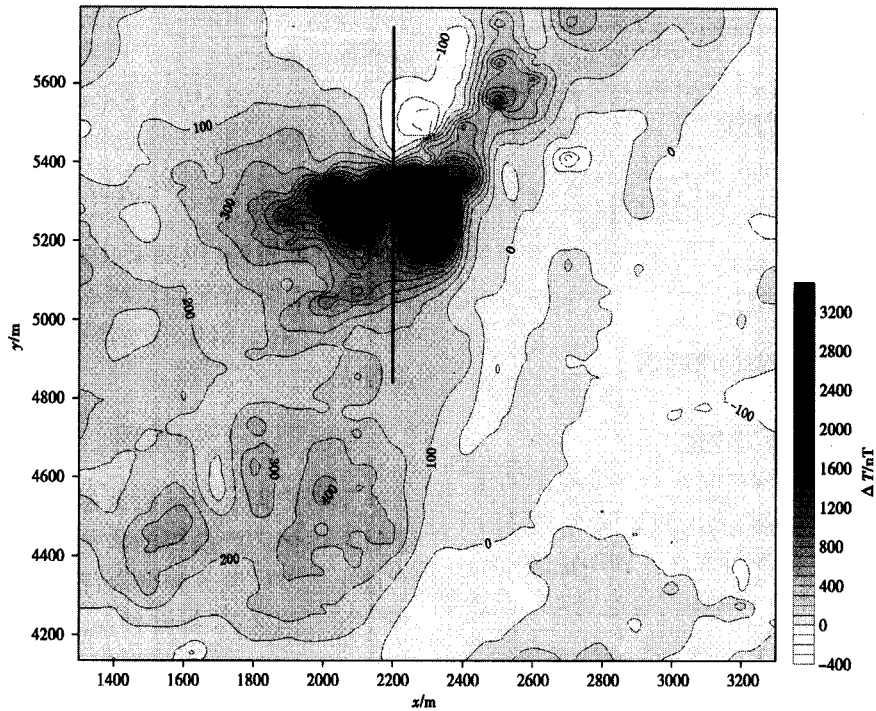
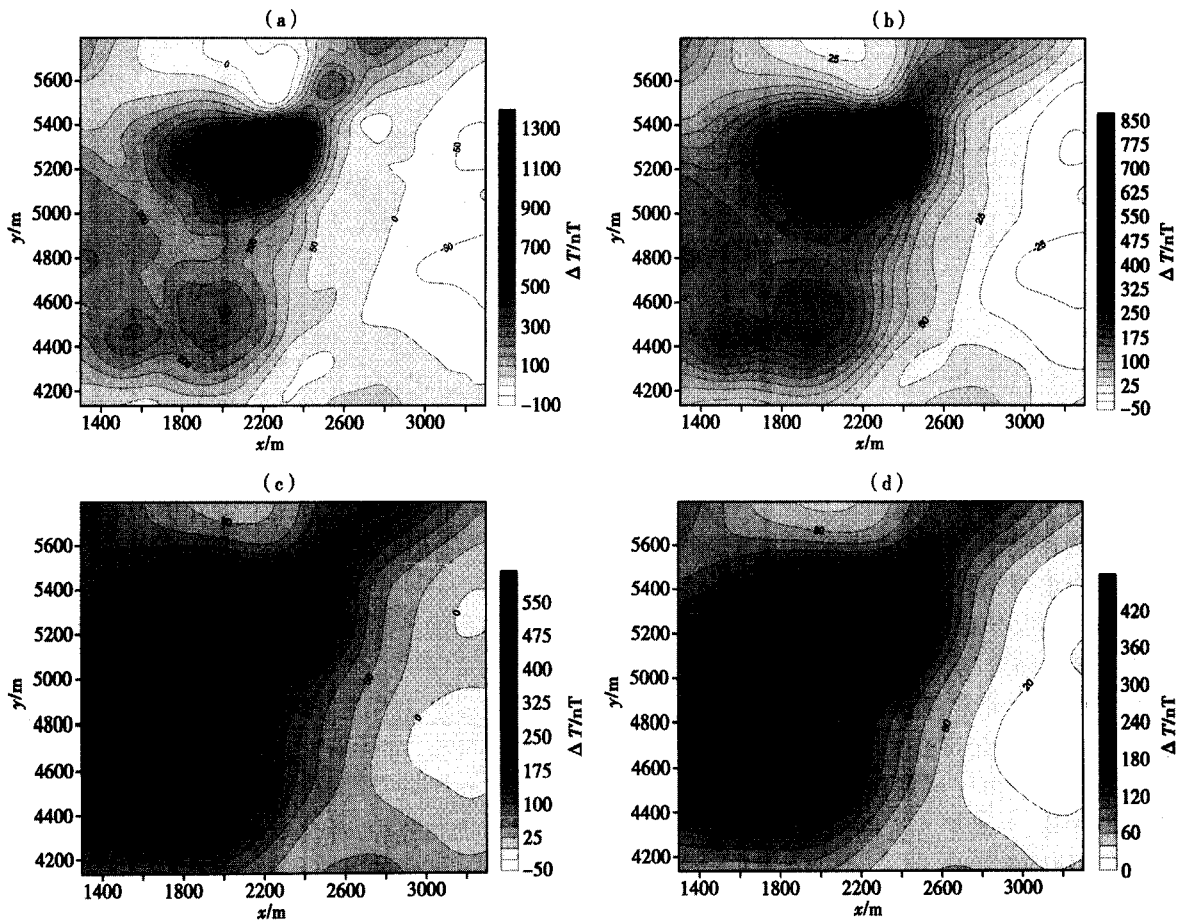


图 3 工区  $\Delta T$  异常平面等值线(图中黑色直线为精测剖面)



a—上延 50 m; b—上延 100 m; c—上延 150 m; d—上延 200 m

图 4 工区  $\Delta T$  异常平面等值线

少被保留下来,会对推断解释造成影响。另外,上延高度及滤波参数与场源深度之间至今尚缺乏严格的数学关系,人们只是凭经验认为上延高度或滤波的波长越大反映的场源深度越深,且在上延高度的磁场所反映的地质构造的深度,比上延高度值要小——仅此仍无法定量地确定深部场源的空间分布信息。2002 年陈玉东教授<sup>[10]</sup>提出利用位场解析延拓结合主成份分析方法,可以在无任何先验信息的

前提下,确定场源深度。该方法要求地质模型为近似等轴状、异常为单一形体引起,否则分析误差较大。笔者采用小波分析的方法对异常进行多尺度分解,不同尺度的细节突出了不同深度场源的信息,最后结合功率谱分析的方法求取细节异常所反映的场源深度。这样就可以观察到深部场源在不同深度的平面展布,了解其三维空间分布状况<sup>[5-6]</sup>。

图 5 为工区  $\Delta T$  异常的小波多尺度分解结果,

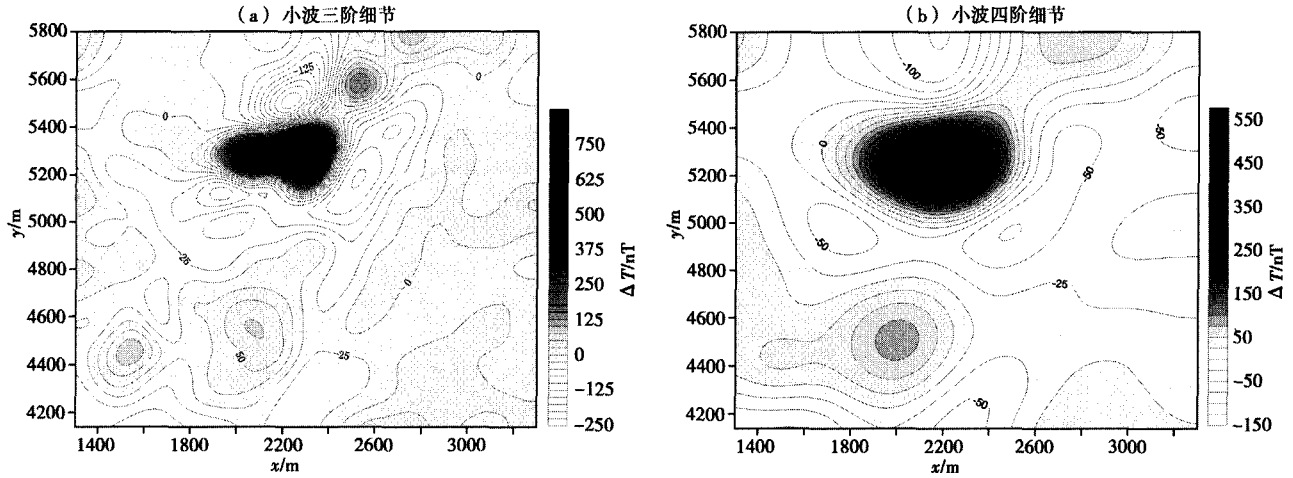


图 5 工区  $\Delta T$  异常小波分解结果

可以看出,小波三阶、四阶细节显著的反应了地质体产生的异常响应,而四阶逼近(图没有给出)主要反应的是背景场。结合功率谱分析<sup>[8-9]</sup>可知,三阶小波细节反应的深度为 130 m,四阶小波细节反应的深度为 320 m,而四阶小波逼近所反应的深度为 450 m。综合分析可知,该异常体的埋深主要在 130 ~ 320 m。

图 6 为精测  $\Delta T$  剖面异常,实线为原平面异常,虚线为上延 100 m 后的异常。本工区地磁倾角约为  $64^\circ$ ,该剖面南北走向,上延 100 m 后的  $\Delta T$  异常表现为斜磁化向下有限延伸的磁性体异常,异常极大值在 100 ~ 200 号点之间。而 200 ~ 250 号点有一局部异常,异常尖锐呈双峰,推测是由较浅的磁性体引

起,上延 100m 后,该异常消失,说明其埋深不大。

应用经验切线法、欧拉奇次方程进行反演计算,推断主磁性体为向下有限延伸的板状体,水平位置在 160 号点附近,顶界埋深分别是 128.6 m 和 129.2 m。二度半人机交互反演方法计算得到:位于 160 号点附近的主磁性体顶界埋深约 130 m,磁化强度约 110 A/m,向南倾;而 200 ~ 250 号点叠加异常反应的浅部小磁性体顶界埋深约 10 m,磁化强度约 5 A/m。利用二度半人机交互反演推断的结果进行正演模拟,得出的正演异常曲线形态基本与实测异常

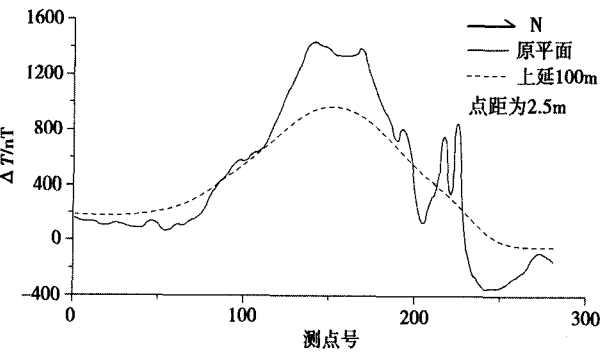


图 6 精测剖面  $\Delta T$  磁异常及上延 100 m 高度结果

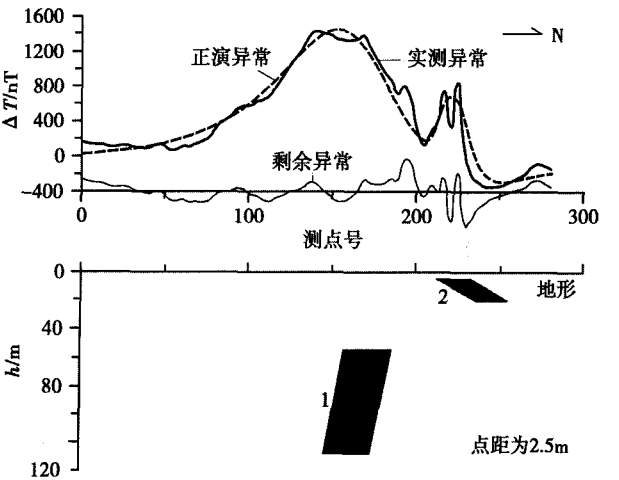


图 7 精测剖面二度半人机交互反演结果

曲线吻合(图7)。

### 3 结论

小波多尺度分解方法对磁异常进行多尺度分析能较好地揭示深部场源的赋存信息,计算精度可靠,较传统的延拓、滤波等磁测数据处理方法有更高的分辨率。通过对工区平面资料的小波分析,得到了场源的埋深信息。结合剖面资料的经验切线法、欧拉奇次方程反演以及二度半人机交互反演算法,得到了异常体的埋藏深度、赋存形态等参数,符合了工作要求。

笔者主要对方法理论及实践应用进行分析,是对生产实践工作的总结,并通过归纳总结一套较为简单适用的野外磁测资料的常规处理流程,希望能与野外物探工作者交流探讨,提高室内资料处理的效率。

### 参考文献:

[1] Leblanc G E, Morris W A. Denoising of aeromagnetic data via the

wavelet transform[J]. *Geophysics*, 2001, 66(4): 1793-1804.

- [2] 侯遵泽, 杨文采. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. *地球物理学报*, 1997, 40(1): 85-95.
- [3] 高德章, 侯遵泽, 唐健. 东海及邻区重力异常多尺度分解[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(6): 842-849.
- [4] 张先, 赵丽, 刘天佑, 等. 北京地区航磁异常的多尺度分解及断裂研究[J]. *地震学报*, 2006, 28(5): 504-512.
- [5] 刘天佑, 吴招才, 詹应林, 等. 磁异常小波多尺度分解及危机矿山的深部找矿: 以大冶铁矿为例[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2007, 32(1): 135-140.
- [6] 刘天佑, 刘大为, 詹应林, 等. 磁测资料处理新方法及其在危机矿山挖潜中的应用[J]. *物探与化探*, 2006, 30(5): 377-381.
- [7] Spector A, Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[J]. *Geophysics*, 1970. 35: 293-302.
- [8] Bhattacharyya B K, Lei K. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two dimensional structure[J]. *Geophysics*, 1975, 40: 993-1013.
- [9] 贺日政, 高锐, 郑洪伟, 等. 青藏高原中西部航磁异常的匹配滤波分析与构造意义[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1131-1139.
- [10] 陈玉东. 解析法与随机法联合定量反演位场[J]. *物探与化探*, 2002, 26(6): 470-474, 482.

## THE MAGNETIC FIELD DATA PROCESSING AND INTERPRETATION METHODS BASED ON WAVELET ANALYSIS

ZHANG Heng-lei, LIU Tian-you

(Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to analyze characteristics of underground sources of the high accuracy magnetic data in an effective way, the authors employed wavelet transform to make a multi-scale analysis of the magnetic data. Based on the inversion and interpretation of the plane and profile data, this paper built a geophysical model for the working area by using the 2.5D inversion method. Tests show that the wavelet method can separate the information of different underground sources effectively and has reliable calculation accuracy and higher resolution than traditional extension and filtering methods.

**Key words:** magnetic exploration; wavelet analysis; inversion of 2.5D model; matched filtering

**作者简介:** 张恒磊(1983-), 男, 现在中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院攻读博士学位, 研究方向为地球物理资料处理方法及综合地球物理方法研究。