

张恒磊, Marangoni Y R, 左仁广等. 2014. 改进的各向异性标准化方差探测斜磁化磁异常源边界. 地球物理学报, 57(8):2724-2731, doi:10.6038/cjg20140830.

Zhang H L, Marangoni Y R, Zuo R G, et al. 2014. The improved anisotropy normalized variance for detecting non-vertical magnetization anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(8):2724-2731, doi:10.6038/cjg20140830.

## 改进的各向异性标准化方差探测斜磁化磁异常源边界

张恒磊<sup>1,2</sup>, Y. R. Marangoni<sup>2</sup>, 左仁广<sup>3</sup>, 胡祥云<sup>1\*</sup>

1 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074

2 Geophysics Department, Sao Paulo University, Sao Paulo, Brazil

3 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

**摘要** 针对存在强剩磁作用磁化方向不明的磁异常, 本研究探索直接处理斜磁化磁异常的识别, 提出了基于磁力梯度张量模的各向异性边界探测方法. 首先利用各向异性尺度改进了各向异性标准差的核函数, 突出各向异性高斯函数的作用; 结合磁力梯度张量模来削弱斜磁化的影响. 数值实验模拟了一组复杂磁异常模型, 在斜磁化条件下分析该研究方法的边界探测效果. 实验表明: 改进方法, 即磁力梯度张量模的各向异性标准化方差, 它可以探测非垂直磁化磁异常的磁源边界; 同时指出, 改进方法比基于三维解析信号振幅的各向异性标准化方差对磁化方向的依赖性更小. 将该方法应用于中国西部某磁铁矿集区的精细探测, 在非垂直磁化条件下对实测磁异常直接进行边界探测, 获得了较为理想的处理结果.

**关键词** 磁法勘探; 各向异性标准化方差; 梯度张量; 边界探测

doi:10.6038/cjg20140830

中图分类号 P631

收稿日期 2013-10-25, 2014-03-12 收修定稿

### The improved anisotropy normalized variance for detecting non-vertical magnetization anomalies

ZHANG Heng-Lei<sup>1,2</sup>, Y. R. Marangoni<sup>2</sup>, ZUO Ren-Guang<sup>3</sup>, HU Xiang-Yun<sup>1\*</sup>

1 Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 Geophysics Department, Sao Paulo University, Sao Paulo, Brazil

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

**Abstract** For the magnetic field with unknown magnetization direction, it is necessary to study the edge detection for the magnetic source of oblique magnetization directly. In this study, we propose a new edge detection called anisotropy normalized variance based on magnetic gradient tensor (ANV\_MGT). First we use an anisotropy scale to improve the core function of ANV to show the effect of the anisotropy Gaussian function. Then the magnetic gradient tensor mode is used in the ANV method to process the anomalies with oblique magnetization. We construct a numerical model of complex magnetic anomalies with oblique magnetization, which is used to test the edge detection method. The model test shows that the proposed method, ANV\_MGT, can detect the edge of the magnetic source with non-vertical magnetization direction. It also shows that the proposed method is better than application of ANV on the 3D analytic signal amplitude.

**基金项目** 圣保罗州基金(2012/00593-9), 中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费(CUG120815, CUG120501, CUG120116, CUG130103)、中国地质调查局项目(12120113101800)和国家重点基础研究发展计划 973 项目(2013CB733200)联合资助.

**作者简介** 张恒磊, 男, 1984 年生, 博士后, 主要研究方向为位场理论与重磁勘探. E-mail: sky0610@163.com

\* **通讯作者** 胡祥云, 男, 1966 年生, 教授. E-mail: xyhu@cug.edu.cn

In the application to real data from western China, a perfect magnetite ore location is determined by performing ANV\_MGT for the non-reduction to the pole data.

**Keywords** Magnetic exploration; Anisotropy normalized variance; Gradient tensor; Edge detection

## 1 引言

在位场领域,对重磁异常进行精细处理可以快速获取有关构造体系、岩性变化等丰富的地下地质信息,是地质-地球物理解释中的一项重要工作. 近几年来,有大量的关于边界探测的研究报道(Lahti and Karinen, 2010; Cooper and Cowan, 2011; 张恒磊等, 2011; 张恒磊等, 2012; 马国庆等, 2012; Santos et al., 2012; 王彦国等, 2013; Cooper, 2013; Zhou et al., 2013). 对于磁异常边界探测方法,大多数研究都是基于垂直磁化磁异常,即首先要对实测异常进行化极处理. 而当研究区磁化方向不明时,化极结果不能客观反映垂直磁化场特征;此外,低纬度化极过程的不稳定性也是制约这类方法应用的因素之一. 自从 Nabighian(1972)指出解析信号可以消除二维异常的斜磁化影响,三维解析信号振幅得到了广泛的应用研究,虽然它无法完全消除三维条件下的斜磁化影响,但是在低纬度地区或者磁化方向不定的研究区,采用三维解析信号振幅减小斜磁化的影响是应用非常普遍的方法. Verduzco 等人(2004)基于二度磁异常公式推导出 Tilt 梯度的水平导数不受磁化方向影响的认识,并推广应用到三维磁异常. 近几年来,随着磁力梯度张量测量系统的改善,相应的处理方法与解释技术得到迅速发展(Clark et al., 2009; Beiki, 2010; Beiki and Pedersen, 2010; Beiki et al., 2011; Beiki et al., 2012; Oruç et al., 2013). 前人研究指出,通过对张量数据的某种处理,可以有效减小对磁化方向的依赖性,譬如张量模、张量  $I_1$  不变量以及归一化场源强度(Beiki et al., 2012)等方法.

我们前期研究(张恒磊等, 2011)提出的各向异性标准化方差(Anisotropy Normalized Variance, ANV)计算重磁源边界的方法,已经验证不仅可以实现对弱异常的有效分析,同时受噪声的影响较小. 有两个问题值得深入的是:(1)首先,ANV 方法是

基于垂直磁化磁异常推导的,它无法针对斜磁化磁异常进行处理;(2)前期研究相当于是在各向异性条件下,突出全方位扫描的贡献. 基于此,本项研究从各向异性核函数的角度作改进,以自适应方向取代全方位扫描,以各向异性尺度构造核函数,突出核函数本身在算法中的物理意义;为了消弱斜磁化的影响,本文提出基于磁力梯度张量的各向异性标准化方差方法,并通过理论模型实验与实际应用,检验方法在斜磁化条件下,对不同幅值磁异常的探测效果.

## 2 方法原理分析

### 2.1 各向异性标准化方差

考虑地质构造方向  $\theta$ , 令  $R_\theta = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$  表示  $\theta$  角度的旋转,构造各向异性高斯函数如下:  
 $G_R(R_\theta(x, y)^T) =$

$$\frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{h^2}(\omega_1 + \text{cof}^2 \cdot \omega_2)\right), \quad (1)$$

其中  $\omega_1 = (x\cos\theta + y\sin\theta)^2$ ,  $\omega_2 = (-x\sin\theta + y\cos\theta)^2$  是对坐标  $x, y$  进行  $R_\theta$  旋转后的结果,  $\text{cof}$  表示各向异性的尺度.  $\sigma$  表示高斯函数标准差,通常取  $h = \sqrt{2\sigma^2}$ .

根据(1)式,推导  $\nabla^2 G_R = \frac{\partial^2 G_R}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G_R}{\partial y^2}$  得:  
 $Q = \nabla^2 G_R(R_\theta(x, y)^T)$   
 $= \frac{1}{2\pi\sigma^2 h^4} (h^2(-2 - 2\text{cof}^2) + 4\omega_1 + 4\text{cof}^4 \omega_2)$   
 $\times \exp\left(-\frac{1}{h^2}(\omega_1 + \text{cof}^2 \cdot \omega_2)\right).$  (2)

根据以上分析可以看出,各向异性函数  $G_R$  的方向性在其二阶偏导数  $Q$  中表现的更直观,如图 1 所示,其中黑色线表示地质体的边界. 可以看出,  $Q$  函数相当于垂直构造方向进行导数计算,有利于边界探测.

对  $(M+1) \times (M+1)$  大小的  $Q$ , 定义梯度张量模  $f(x, y)$  的各向异性标准化方差如下:

$$f_{\text{var}}(x, y) = \frac{\sum_{i,j=-M/2}^{i,j=M/2} (f(x+i, y+j) - \overline{f_M(x, y)}) \cdot Q(i+M/2+1, j+M/2+1)}{\sqrt{\sum_{i,j=-M/2}^{i,j=M/2} (f(x+i, y+j) - \overline{f_M(x, y)})^2} \sqrt{\sum_{i=1, j=1}^{i,j=M+1} Q(i, j)^2}}, \quad (3)$$

其中  $\overline{f_M(x,y)} = \frac{1}{(M+1)^2} \sum_{i,j=-M/2}^{i,j=M/2} f(x+i,y+j)$ .

定义磁异常梯度张量值为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_x}{\partial x} & \frac{\partial T_x}{\partial y} & \frac{\partial T_x}{\partial z} \\ \frac{\partial T_y}{\partial x} & \frac{\partial T_y}{\partial y} & \frac{\partial T_y}{\partial z} \\ \frac{\partial T_z}{\partial x} & \frac{\partial T_z}{\partial y} & \frac{\partial T_z}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其张量模  $f$  定义为:

$$f = |\mathbf{G}| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 T_{ij}^2}. \quad (5)$$

## 2.2 算法对比与物理意义分析

从本质上讲,改进前后的两种算法的核函数对场源边界探测的贡献是一致的,它们都是通过窗口间的褶积计算,压制高频振荡的同时提取边界异常.不同之处在于:

(1)张恒磊等(2011)的研究是针对垂直磁化磁异常,在各向异性条件下,通过全方位扫描,获取最优的边界探测效果;

(2)改进算法是针对斜磁化磁异常,通过定义各向异性尺度突出核函数的贡献,以自适应方向取代全方位扫描计算,突出“各向异性”的物理意义;

(3)前期研究的针对化极磁异常的 ANV 方法是以磁场的二阶导数为基础研究场源边界;改进算法为了消除斜磁化影响,引入磁力梯度张量模,它相当于磁场的三阶导数,增强对弱异常的探测效果.

计算改进的各向异性标准化方差需要首先确定以下参数:核函数标准差  $\sigma$ 、窗口  $M$ 、各向异性尺度  $\text{cof}$  以及方向  $\theta$ . 分别讨论如下:

(1)将核函数理解为滤波函数,核函数标准差  $\sigma$  无单位,窗口大小  $M$  表示窗口内点数亦无单位. 本研究将  $\sigma$  与  $M$  联系起来. 假设,当滑动点到窗口中心点的距离(该距离以点数衡量,即  $M$ )大于三倍标准差时,其值很小——基于此,本文研究中取  $\sigma = M/3$ .

(2)窗口大小根据噪声水平而定,使用较大的窗口一方面可以压制干扰,另一方面可能忽略小于该窗口的信息.

(3)关于各向异性尺度,  $\text{cof}$  值大,即函数  $Q$  的长短轴差异大,有利于边界分析,如图 1 所示. 在实际应用中,通常当异常源各向异性特征显著时,  $\text{cof}$  的取值大一些有利于边界探测(通常取  $\text{cof}=2$ ).

(4)关于方向  $\theta$ ,本文采用自适应方向计算:

$$\theta = \arctan(f_x/f_y), \quad (6)$$

其中  $f_x$  和  $f_y$  分别指  $x$ 、 $y$  方向的方向导数.

本文的算法流程如图 2 所示,如果有观测磁力梯度张量值,则可以直接进行计算,否则需要将  $\Delta T$  先通过转换处理得到各分量结果. 本文方法有以下几方面特点:

(1)首先,各向异性尺度  $\text{cof}$  的作用相当于局部区域计算特定方向的水平方向导数,它能够自适应地根据异常特征确定“导数方向”,有利于边界精确探测.

(2)各向异性高斯函数不仅具有获取场导数的功能,同时起到了高斯圆滑的作用,保证“高通滤波”的稳定计算.

(3)基于梯度张量模,改进算法可以减小对磁化方向的依赖性,它可以在未知磁化方向条件下对斜

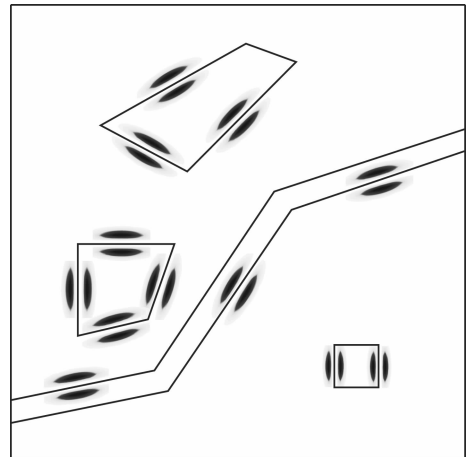


图 1 各向异性  $Q$  函数示意图

Fig. 1 Schematic of anisotropy function

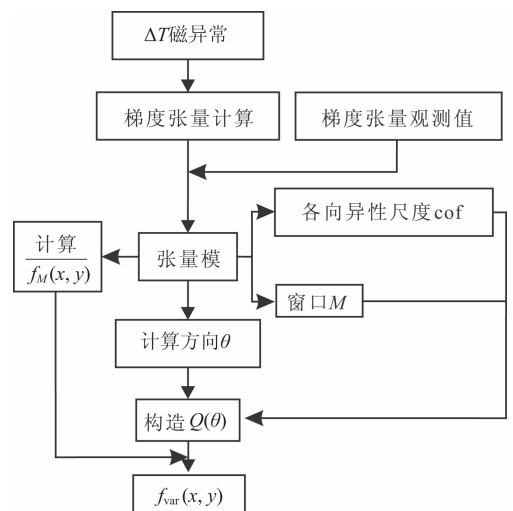


图 2 本文算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the algorithm in this paper

磁化磁异常进行处理.此外,如前所述,该方法相当于磁场的三阶导数,它与基于化极磁异常的各向异性标准化方差不同,以梯度张量模为基础的改进算法以最大幅值为特征探测场源边界.

### 3 理论模型分析

为对本文方法进行验证,我们设计了一组弱磁异常探测模型:近海海洋勘探中的弱异常探测模型(Santos et al., 2012).模型 1 模拟的是由海岸向近海延伸的方向上海水渐深,目标体埋藏深度(异常体与观测面即海平面的距离)逐渐增大的过程.模型 2 模拟的是位于海底的局部构造.设计该模型的目的有两点:(1)模拟近海海洋勘探中的地下(水下)异常源与观测点不均匀的特征,研究方法的适用效果;(2)在背景场叠加的情况下,研究方法对局部弱异常的探测能力.图 3a 是根据该模型正演得到的斜磁化时的磁异常,图 3b 对应的是模型剖面图,其中 1 号异常体北侧深度增大、异常幅值逐渐变小;2 号异常体较大的埋藏深度以及较小的规模导致其产生的异常幅值也较弱.可以看出,受斜磁化的影响,磁异常

与场源体之间的对应关系不明确,尤其是弱异常区.

以往大部分边界探测方法都要求垂直磁化磁异常,如 Tilt 梯度,虽然也有学者将该方法直接应用于斜磁化磁异常的边界探测(Santos et al., 2012).作为对比,我们也对图 3a 计算了 Tilt 梯度,如图 4a 所示.显然,该结果并不能客观反映出异常体的边界信息.图 4b 是 Tilt 梯度的水平导数,Verduzco 等(2004)指出该方法不受磁化方向的影响.可以看出,Tilt 梯度的水平导数增强了对边界的探测效果,同时也产生了一些虚假异常.图 5 是梯度、张量的计算结果,其中张量不变量  $I_1$  和张量  $Mu$  值计算如下:

$$\begin{cases} I_1 = T_{11} \cdot T_{22} + T_{33} \cdot T_{22} + T_{11} \cdot T_{33} - T_{12}^2 \\ \quad - T_{23}^2 - T_{31}^2, \\ Mu = \sqrt{-L_2^2 - L_1 \cdot L_2}, \end{cases} \quad (7)$$

其中  $L_1$  和  $L_2$  计算请参考文献(Beiki et al., 2012).

可以看出,梯度、张量结果一定程度上降低了斜磁化的影响,增强了异常与场源的一一对应关系.另一方面,这些方法都具有高通滤波的性质,因此对深部弱异常的探测能力不足.如图 5 所示,四个结果都较好地反映出模型 1 的南侧边界,但是对北侧边界反映微弱,同时对模拟的局部弱异常模型(模型 2)

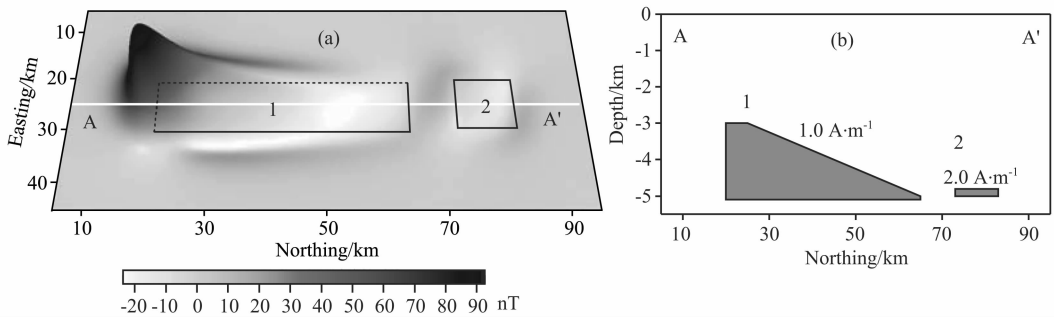


图 3 磁异常模型(模型水平位置如图中黑色线)

(a) 正演磁异常(倾角  $15^\circ$ , 偏角  $20^\circ$ ); (b) 模型剖面图(位置如图 3a 中白色线).

Fig. 3 Model of magnetic anomalies. Black line denotes location of model in plane  
(a) Magnetic anomalies by forward modeling with an inclination of  $15^\circ$  and a declination of  $20^\circ$ ;  
(b) Cross section of model. Its location is shown by white line in (a).

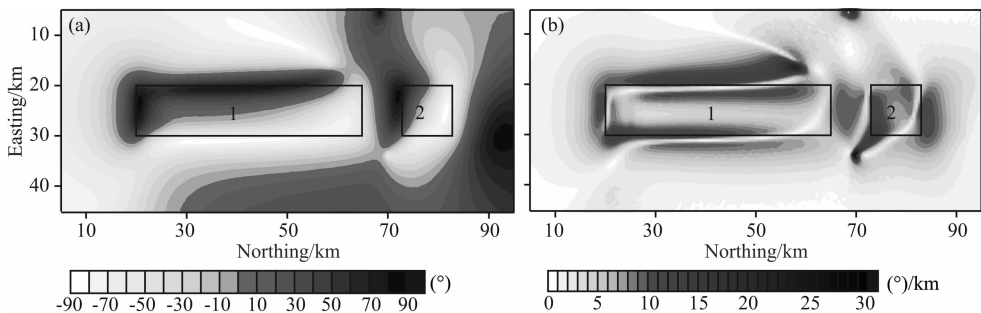


图 4(a) Tilt 梯度; (b) Tilt 梯度的水平导数

Fig. 4 (a) Tilt gradients; (b) Horizontal derivatives of Tilt gradients

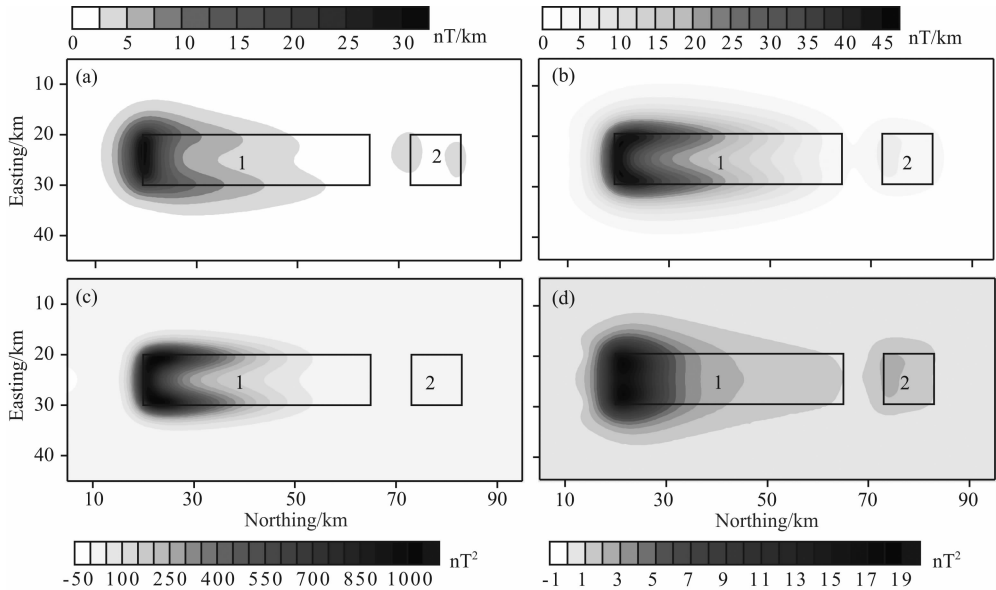


图5 梯度、张量结果

(a) 三维解析信号振幅; (b) 张量模; (c) 张量  $I_1$  不变量; (d) 张量  $Mu$  值.

Fig. 5 Results of gradients and tensors

(a) 3D analytical signal amplitude; (b) Tensor modules; (c) Invariable of tensor  $I_1$ ; (d)  $Mu$  value of tensor.

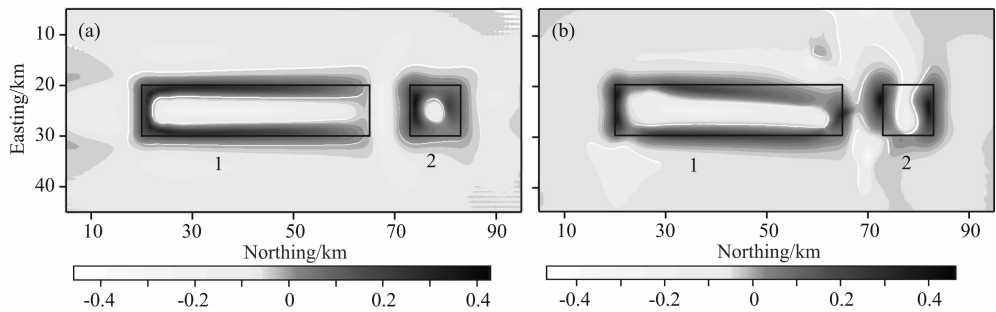


图6 基于张量模(a)和三维解析信号振幅(b)的各向异性标准化方差

Fig. 6 Anisotropic normalized variances based on tensor mode (a) and 3D analytic signal amplitude (b)

的反映也不明显。

图 6a 是采用本文方法计算的结果,基于张量模的各向异性标准化方差不仅可以减小斜磁化的影响,同时提高了对深部弱异常的探测.作为对比,我们计算了基于三维解析信号振幅的各向异性标准化方差(图 6b),显然,图 6a 的效果要优于图 6b,说明在三维异常条件下,磁异常张量模对磁化方向的依赖性要低于三维解析信号振幅。

### 4 实例应用

图 7a 显示的是中国西部某磁铁矿勘探区的磁异常,前期地质、钻探工作已经验证该区属于富铁矿集区.该区岩矿石磁性特征相对简单:铁矿体具有强磁性,围岩无磁性或弱磁性.磁异常南侧为正,北侧伴生有负异常,呈北西南东走向.前期见矿钻孔大多

聚集在磁异常梯度带上,但是总体对应关系不明确,此外研究区东侧钻孔 P17-2 钻遇厚层磁铁矿,而该处的磁异常强度只有大约 200 nT.为了摸清铁矿体边界位置,为后续勘探提供依据,需要对该区磁异常实施精细处理.为了避免矿集区剩磁等不确定因素的影响,本文直接针对实测磁异常进行处理(不作化极)。

首先,图 7b 显示的是 Tilt 梯度的水平导数结果,类似于图 4b, Tilt 梯度的方向导数产生虚假异常,难以有效探测出场源体边界.图 8 是根据图 7a 的原始异常计算得到的梯度、张量结果,它们都一定程度上降低了斜磁化的影响,与实际探明铁矿体位置有更加明确的一一对应关系,遗憾的是对叠加异常、研究区东侧的弱异常探测不足. Zhang 等(2013)研究表明,该区主异常(位于 P4—P9 线之间)是由南北两个异常叠加而成的, P9 线往东至 P18 线之间

存在若干个局部磁铁矿体,并且局部断裂构造发育. 这两个显著特征都没有能在图 8 的结果中得到反映.

图 9a 是采用本文方法基于磁力梯度张量模的结果,图 9b 是基于三维解析信号振幅,对比可以发

现,图 9a 对于叠加异常 B 的反映效果要优于图 9b. 它们不仅减小了斜磁化的影响,比较清晰地区分了叠加于主异常中的 A、B 两个次级异常,同时对研究区东侧的弱异常探测效果也有很大改善. 结合图 9 与钻孔资料,详细分析如下:

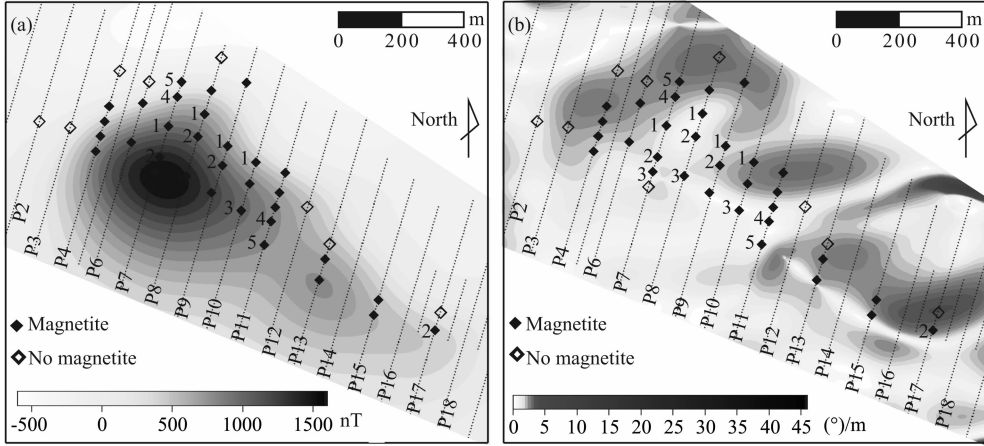


图 7 (a)实测磁异常(未做化极处理);(b)Tilt 梯度的水平导数

Fig. 7 (a) Measured magnetic anomalies (not reduction to the pole); (b) Horizontal derivatives of Tilt gradients

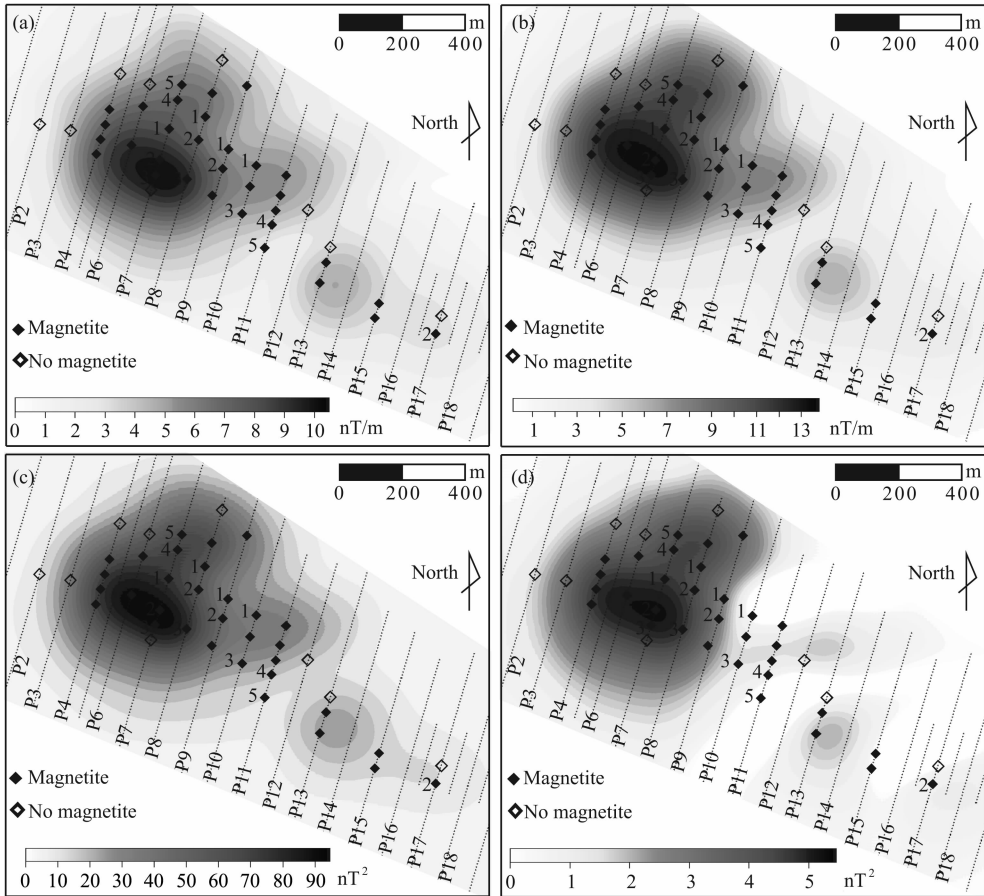


图 8 梯度、张量结果

(a)三维解析信号振幅;(b)张量模;(c)张量  $I_1$  不变量;(d)张量  $Mu$  值.

Fig. 8 Results of gradients and tensors

(a) 3D analytic signal amplitude; (b) Tensor module; (c) Invariable of tensor  $I_1$ ; (d)  $Mu$  values of tensor.

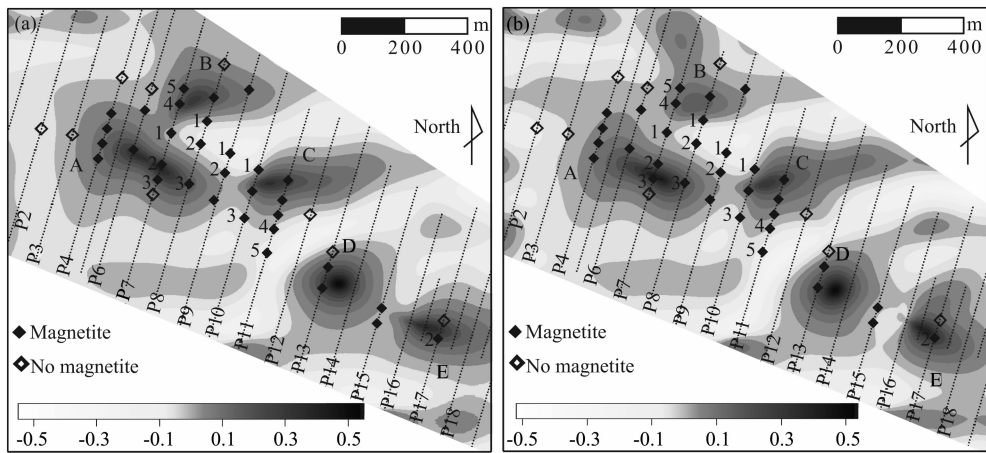


图 9 基于张量模(a)和三维解析信号振幅(b)的各向异性标准化方差

Fig. 9 Anisotropic normalized variance based on tensor module (a) and 3D analytic signal amplitude (b)

(1) 钻孔验证铁矿体上顶深度在 210~250 m 之间,主矿体厚度 30 m 以上,矿体呈脉状、板状,北西走向,倾向向南。

(2) P7 测线上的 2、4、5 三个钻孔钻遇铁矿深度都在 300 m 以内,而 1 号钻孔钻遇铁矿深度约 350 m;同时 P8 测线上的 3 号钻孔钻遇铁矿深度为 220 m,而 1、2 号两个钻孔钻遇铁矿深度接近 400 m,同时 2 号钻孔钻遇铁矿深度较 1 号钻孔更深,铁矿厚度变薄。以上特征与图 9a 的结果相吻合。

(3) P9 测线位于 A 与 C 两个异常的鞍部,对应钻孔 P9-1 揭示的见矿深度为 440 m 左右,见矿厚度约 4 m。

(4) 对于 C 异常,钻孔 P10-3、P11-4 以及 P11-5 显示为见矿钻孔,却位于各向异性标准化方差得到的矿体边界之外,为什么呢? 首先,P10-3 见矿是北侧矿体南倾的结果;其次,P11-5 钻孔见矿深度在 400 m 以下,而见矿厚度只有 1 m,更加清晰表明矿体南倾至逐渐尖灭的过程。与此同时,原本在 P17 测线上难以识别的局部异常也被比较好地突显出来,与见矿钻孔相印证。

## 5 结论

从 20 世纪 70 年代初至今,前人在磁异常边界探测研究领域积累了很多成果,并不断有新研究成果涌现。该研究方向的难点在于磁异常的复杂性使得大多数方法都是基于垂直磁化磁异常,在低纬度地区或者磁化方向不明时,很难有效地应用。本文开展斜磁化磁异常的边界探测研究,得到以下几点认识:

(1) 首先是大多数传统边界探测方法都是基于

垂直磁化磁异常,譬如 Tilt 梯度方法,若对斜磁化异常采用 Tilt 梯度方法,虽然可以实现“均衡滤波”(即在突出深部弱异常的同时不过分压制浅部异常),却不能够用来探测场源边界。

(2) 磁异常张量模对磁化方向的削弱效果优于三维解析信号振幅。

(3) 在磁异常梯度张量的基础上采用各向异性标准化方差,可以对未知磁化方向的斜磁化磁场进行边界探测。

(4) 在边界探测的基础上研究场源埋藏深度,是值得进一步研究的方向。

**致谢** 笔者对两位评审专家中肯的意见与建议表示真诚的感谢!

## References

- Beiki M. 2010. Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location. *Geophysics*, 75(6): 159-174.
- Beiki M, Pedersen L B. 2010. Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies. *Geophysics*, 75(6): I37-I49.
- Beiki M, Pedersen L, Nazi H. 2011. Interpretation of aeromagnetic data using eigenvector analysis of pseudogravity gradient tensor. *Geophysics*, 76(3): L1-L10.
- Beiki M, Clark D A, Austin J R, et al. 2012. Estimating source location using normalized magnetic source strength calculated from magnetic gradient tensor data. *Geophysics*, 77(6): J23-J37.
- Clark D A. 2009. Improved methods for interpreting magnetic gradient tensor data. IAGA 11th Scientific Assembly.
- Cooper G R J, Cowan D R. 2011. A generalized derivative operator for potential field data. *Geophysical Prospecting*, 59(1): 188-

- 194.
- Cooper G R J. 2013. Reply to a discussion about the “Hyperbolic tilt angle method” by Zhou et al. *Computers & Geosciences*, 52: 496-497.
- Lahti I, Karinen T. 2010. Tilt derivative multiscale edges of magnetic data. *The Leading Edge*, 29(1): 24-29.
- Ma G Q, Huang D N, Yu P, et al. 2012. Application of improved balancing filters to edge identification of potential field data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(12): 4288-4295.
- Nabighian M N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section; its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507-517.
- Oruç B, Sertçelik I, Kafadar Ö, et al. 2013. Structural interpretation of the Erzurum Basin, eastern Turkey, using curvature gravity gradient tensor and gravity inversion of basement relief. *Journal of Applied Geophysics*, 88: 105-113.
- Santos D F, Silva J B C, Barbosa V C F, et al. 2012. Deep-pass—An aeromagnetic data filter to enhance deep features in marginal basins. *Geophysics*, 73(3): J15-J22.
- Verduzco B, Fairhead J D, Green C M, et al. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2): 116-119.
- Wang Y G, Zhang F X, Liu C, et al. 2013. Edge detection in potential fields using optimal auto-ratio of vertical gradient. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(7): 2463-2472.
- Zhang H L, Liu T Y, Yang Y S. 2011. Calculation of gravity and magnetic source boundary based on anisotropy normalized variance. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(7): 1921-1927.
- Zhang H L, Hu X Y, Liu T Y. 2012. Fast inversion of magnetic source boundary and top depth via second order derivative. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(11): 3839-3847.
- Zhang H L, Ravat D, Hu X Y. 2013. An improved and stable downward continuation of potential field data: The truncated Taylor series iterative downward continuation method. *Geophysics*, 78(5): J75-J86.
- Zhou W N, Du X J, Li J Y. 2013. A discussion about hyperbolic tilt angle method. *Computers & Geosciences*, 52: 493-495.

### 附中文参考文献

- 马国庆, 黄大年, 于平等. 2012. 改进的均衡滤波器在位场数据边界识别中的应用. *地球物理学报*, 55(12): 4288-4295.
- 王彦国, 张凤旭, 刘财等. 2013. 位场垂向梯度最佳自比值的边界检测技术. *地球物理学报*, 56(7): 2463-2472.
- 张恒磊, 刘天佑, 杨宇山. 2011. 各向异性标准化方差计算重磁源边界. *地球物理学报*, 54(7): 1921-1927.
- 张恒磊, 胡祥云, 刘天佑. 2012. 基于二阶导数的磁源边界与顶部深度快速反演. *地球物理学报*, 55(11): 3839-3847.

(本文编辑 何燕)