

# 重磁场的变差函数特征及应用

刘 双, 胡祥云\*, 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:** 用变差函数研究重磁场的区域变化特征. 变差函数的变程反映重磁场的相干范围, 块金效应反映随机干扰, 基台值反映变异程度. 重磁场的理论模拟说明: 重力场的相干范围大于磁场, 重磁场变程主要取决于场源深度, 浅源重磁场变差函数近似为球状模型或指数模型, 深源重磁场近似为连续性更好的高斯模型. 磁场场源深度近似等于变程的一半, 重力场场源深度近似等于变程的四分之一. 湖北大冶铁矿垂直分量磁异常具有几何各向异性, 北西—南东走向, 变差函数推测磁铁矿平均深度为 250 m. 磁异常小波多尺度分解细节和逼近部分磁场具有协调几何各向异性, 变差函数的各阶场源深度估计结果与功率谱估计结果吻合.

**关键词:** 重磁场; 变差函数; 变程; 块金效应; 基台值; 大冶铁矿; 地质统计学.

中图分类号: P631

文章编号: 1000-2383(2014)11-1625-10

收稿日期: 2014-04-03

## Characteristics and Applications of Variogram for Gravity and Magnetic Fields

Liu Shuang, Hu Xiangyun\*, Liu Tianyou

*Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*

**Abstract:** The variogram is used to investigate the regional variation characteristics of gravity and magnetic fields in this study. The range of variogram reflects the coherent area; the nugget effect represents the random disturbance; and the sill means the variation degree. The theoretical simulations involving gravity and magnetic fields show that the coherent range of gravity field is larger than that of magnetic field. The range of potential gravity and magnetic field is mainly determined by the depth of field sources. The variogram for shallow sources is approximate to be a spherical or exponential model, while with the increase of the depth, it nearly becomes a more continuously Gaussian model. The depth of magnetic source is approximately equal to the half of the range, whereas the depth of gravity source is approximately equal to one quarter of the range. The real example of the vertical component magnetic anomaly of the Daye iron-ore deposit in Hubei has geometric anisotropy striking northwest-southeast direction. The variogram reveals that the average depth of magnetite orebodies is about 250 m. The decomposed details and approximations of magnetic anomaly using wavelet transform have the coordinate geometric anisotropy. And the estimated depths using variogram ranges are in agreement with those gained by power spectrum method.

**Key words:** gravity and magnetic fields; variogram; range; nugget effect; sill; Daye iron-ore deposit; geostatistics.

## 0 引言

重力勘探和磁法勘探是地质调查、油气和固体矿产勘查中常用的地球物理方法. 研究重磁场的区域变化特征对构造划分、成矿预测有重要的意义. 为了表征重磁场的区域变化, 传统的概率统计学通常采用均值、方差等参数. 均值表示重磁异常的平均强

度, 方差表示重磁场强度的变化程度. 但是, 均值和方差只能反映重磁场的总体特征, 却不能反映空间变化结构特征.

变差函数是地质统计学的基本工具, 由法国统计学家 Matheron(1971)提出. 它是以区域化变量理论为基础, 研究地质变量在空间分布上的随机性和结构性, 或空间相关性和依赖性(Journel and Huij-

**基金项目:** 中国地质调查项目(No. 12120113101800); 湖北省创新群体项目(No. 2011CDA123).

**作者简介:** 刘双(1985—), 男, 在读博士, 主要从事重磁反演及地球物理综合解释研究. E-mail: laushua@foxmail.com

\* 通讯作者: 胡祥云, E-mail: xyhu@cug.edu.cn

bregts, 1978; Goovaerts, 1997). 目前, 变差函数广泛应用于地震属性提取(杨阳等, 2007)、油气储层预测(李武广等, 2011; 徐立恒等, 2012)、储量计算(胡光道, 1985)、天然地震周期性研究(裴韬等, 2002)等领域. 重磁场不是纯随机变量, 它具有明显的结构特征, 因此可以把重磁场看作区域化变量. 通过研究重磁场变差函数的变程、块金效应、基台值, 可以为推断构造走向、分离区域场与局部场、判断重磁场的影响范围、估计场源深度等提供重要信息.

## 1 重磁场的变差函数

### 1.1 变差函数的定义

变差函数是区域化变量空间变异性的一种度量, 反映空间变异程度随距离的变化特征. 从地质统计学的角度看, 重磁异常可以看做是一种区域化变量, 它具有随机性, 又具有空间相关性(唐声喤等, 1985). 假设空间点  $x$  在一维  $x$  轴上变化, 把区域化变量  $Z(x)$  在  $x, x+h$  两点处的值之差的方差之半定义为在  $x$  方向上的变差函数, 记为  $\gamma(x, h)$ , 即

$$\gamma(x, h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2 - \frac{1}{2} \{E[Z(x) - Z(x+h)]\}^2, \quad (1)$$

式中,  $\text{Var}$  表示方差,  $E$  表示数学期望(孙洪泉, 1990). 地质统计学的实际研究中, 区域化变量  $Z(x)$  通常作平稳假设或本征假设, 此时,  $\gamma$  的取值与  $x$  无关且满足:

$$E[Z(x) - Z(x+h)] = 0. \quad (2)$$

因此, (1)式变差函数表达式简化为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x+h)]^2, \quad (3)$$

其中,  $h$  称为滞后距,  $\gamma$  为变差函数值. 实际应用中, 实验变差函数的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2, \quad (4)$$

式中,  $h$  为某方向上两点的距离, 即滞后距,  $N(h)$  为所有相距为  $h$  两点的点对数目,  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i+h)$  为点  $x_i$  和  $x_i+h$  处的区域化变量值.

变差函数一般用变差曲线来表示, 它是滞后距  $h$  和变差函数值  $\gamma$  的对应关系图. 如图 1a 所示, 是一个理想化的变差曲线. 变差曲线中, 反映区域化变量结构性特征的几个重要的参数分别为  $a$ 、 $C$ 、 $C_0$ 、 $C_1$ , 其中,  $C=C_0+C_1$ .

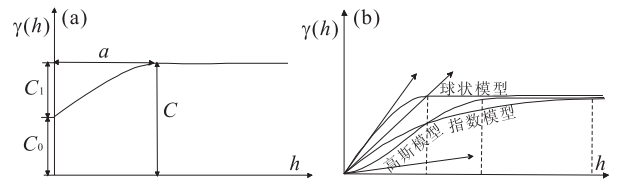


图 1 变差函数示意(a)及 3 种常见的变差函数模型(b)  
Fig. 1 The diagram of variogram (a) and three popular variogram models (b)

图 1a 中,  $a$  称为变程, 反映区域变化量在空间上具有相干性的范围. 当  $h \leq a$  时, 任意两点之间的观测值是相关的, 相关性随  $h$  的变大而减小, 当  $h > a$  时, 就不再具有相关性了. 即  $a$  反映了变量的影响范围.  $C_0$  称为块金效应, 表示区域变化量在很小的距离内发生的变异程度. 块金值越大, 说明数据的连续程度越差, 反之则连续性越好, 它可以由测量误差引起, 也可以是来自于浅部干扰引起的微小变异. 理论上讲, 块金效应相当于变量的纯随机部分.  $C_1$  称为供高,  $C$  称为基台值. 基台值反映区域化变量在研究范围内的总变化强度, 基台值越大说明数据的波动程度越大. 最常用的变差函数理论模型有球状模型(或马特隆模型)、指数模型和高斯模型(图 1b)(孙洪泉, 1990). 球状模型和指数模型在原点处为线性型, 高斯模型在原点处为抛物线型, 高斯模型的连续性比球状模型、指数模型好.

球状模型的一般公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0, \\ C_0 + C \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{h^3}{a^3} \right), & 0 < h \leq a, \\ C_0 + C, & h > a, \end{cases} \quad (5)$$

该模型在原点处  $h=0$ , 切线的斜率为  $3C/2a$ , 切线到达  $C$  值的距离是  $2a/3$ , 变程为  $a$ .

指数模型的一般公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0, \\ C_0 + C(1 - e^{-h/a}), & h > 0, \end{cases} \quad (6)$$

该模型的变程为  $3a$ .

高斯模型的一般公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & h = 0, \\ C_0 + C(1 - e^{-h^2/a^2}), & h > 0, \end{cases} \quad (7)$$

该模型的变程为  $\sqrt{3}a$ . 高斯模型是一种连续性好但稳定性差的模型.

### 1.2 重磁场的变差函数

在平稳假设条件下, 变差函数  $\gamma(h)$  与自相关函

数  $C(h)$  的关系为(孙洪泉, 1990):

$$\gamma(h) = C(0) - C(h). \quad (8)$$

笔者以直立长方体模型为例,研究重磁场的变差函数.假设直立长方体模型的埋深为  $D$ ,厚度为  $C$ ,宽度为  $2b$ ,长度为  $2a$ .Bhattacharyya (1966)导出了直立长方体模型的磁场谱函数表达式.在此基础上,Chilès and Guillen(1984)对该式进行了简化,简化后任意磁化方向或任意分量的磁场谱函数表达式为:

$$E_M(\rho) = \alpha e^{-2D\rho}, \quad (9)$$

式中,  $E_M$  为磁场的谱函数,  $\rho = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $u$  和  $v$  为圆频率,  $D$  为场源的深度,  $\alpha$  为系数.根据 Wiener-Khintchine 关系,自相关函数是谱函数的傅里叶逆变换.因此,磁场的自相关函数  $C_M(h)$  可表示为:

$$C_M(h) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} E_M(\rho) e^{i(u\xi + v\eta)} dudv, \quad (10)$$

式中,  $\xi^2 + \eta^2 = h^2$ .

将(9)式代入(10)式,且根据已知的积分表达式:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} \int_{-\infty-\infty}^{\infty} e^{-\lambda(u^2 + v^2)^{1/2}} e^{i(u\xi + v\eta)} dudv = \frac{\lambda}{(\lambda^2 + \xi^2 + \eta^2)^{3/2}}, \quad (11)$$

因此,(10)式的积分结果为:

$$C_M(h) = \alpha' \left(1 + \frac{h^2}{4D^2}\right)^{-3/2}, \quad (12)$$

将式(12)代入式(8)且令  $C_M(0) = \alpha'$ ,得磁场的变差函数为:

$$\gamma_M(h) = \alpha' \left[1 - \left(1 + \frac{h^2}{4D^2}\right)^{-3/2}\right]. \quad (13)$$

类似地,重力场的谱函数和变差函数分别为(Chilès and Guillen, 1984; 唐声喤等, 1985):

$$E_G(\rho) = \frac{\beta}{\rho} e^{-2D\rho}, \quad (14)$$

和

$$\gamma_G(h) = \beta' \left[1 - \left(1 + \frac{h^2}{4D^2}\right)^{-1/2}\right]. \quad (15)$$

式中,  $\beta, \beta'$  为系数.

式(13)和(15)分别是磁场、重力场直立长方体模型的变差函数表达式.式中,  $\gamma_M(h)$  是磁场的变差函数,  $\gamma_G(h)$  是重力场的变差函数,  $\alpha'$  和  $\beta'$  为系数,  $h$  为滞后距,  $D$  为磁场或重力场的场源深度.式(13)和(15)说明:磁场、重力场的变差函数形态主要取决于场源的深度,其受场源形态影响较小;磁场比重力场

变异程度要快,磁场的相干范围比重力场小;无噪声重磁场的块金值均为 0,基台值分别为  $\alpha'$  和  $\beta'$ ;且当磁场滞后距  $h_M = 2D$  时,  $\gamma_M(h) = 0.646 4\alpha'$ ;重力场滞后距  $h_G = 4D$ ,  $\gamma_G(h) = 0.552 8\beta'$ .因此,若将磁场变差函数基台值的 64.64% 作为变程,则  $a_M = 2D$ ;若将重力场变差函数基台值的 55.28% 作为变程,则  $a_G = 4D$ .此外,根据表达式(13)、(15)可知,长方体模型的重磁场变差函数不完全等同于球状模型、指数模型或高斯模型,也不能较好的展开为三者.但是,理论计算表明:浅源场连续性较差,与球状模型最相似;深源场连续性较好,与高斯模型相似.根据推导的表达式,将磁场变差函数基台值的 64.64% 作为变程,将重力场基台值的 55.28% 作为变程,此时有重磁场变程和场源深度的简单关系.在实际资料计算变程过程中,因为变差曲线的不完整,不能完全按基台值的 64.64% 或 55.28% 来确定变程,应将变差函数从开始到上升平缓这一段滞后距作为变程.

## 2 重磁场的区域变化特征

### 2.1 磁场的变差函数

设一直立长方体模型,其长、宽、高分别为  $a = 2000$  m,  $b = 200$  m,  $c = 200$  m,中心埋深为  $D = 500$  m,磁化强度为  $M = 10000 \times 10^{-3}$  A/m.磁化强度倾角分别为  $I = 45^\circ$  和  $I = 90^\circ$ ,磁化强度偏角为  $0^\circ$ ,产生的  $\Delta T$  异常如图 2a、2b 所示.斜磁化的  $\Delta T$  异常正负伴生,垂直磁化的  $\Delta T$  异常以正值为主.图 2c、2d 分别是图 2a、2b 的  $\Delta T$  磁异常在东、东北、北、北西 4 个方向上的变差曲线.其中,变差函数的角度容差为  $45^\circ$ .对比变差曲线可以得出:(1)图 2c 和 2d 两组变差曲线的形态相似,幅值不同.说明磁化方向不会影响变差函数变程,主要影响变差函数的基台值.因此,磁化方向不会影响磁场的相干范围,只是影响磁场的变异程度.垂直磁化的基台值大于斜磁化的基台值,垂直磁化的变异程度比斜磁化要大;(2)已知磁性体模型为东西走向.变差函数在南—北向的变程最小,约 500 m;北东—南西、北西—南东向的变程相似,约 700 m;东西向的变程最大,约 2000 m.在不同的方向上,磁场的变程不一样.在垂直于磁场走向的方向,磁场的影响范围最小;在平行于磁场走向的方向,磁场的影响范围最大,这反映磁场的几何各向异性;(3)磁场的变差函数近似为球状模型、指数模型和高斯型模型,没有明显的水平基台

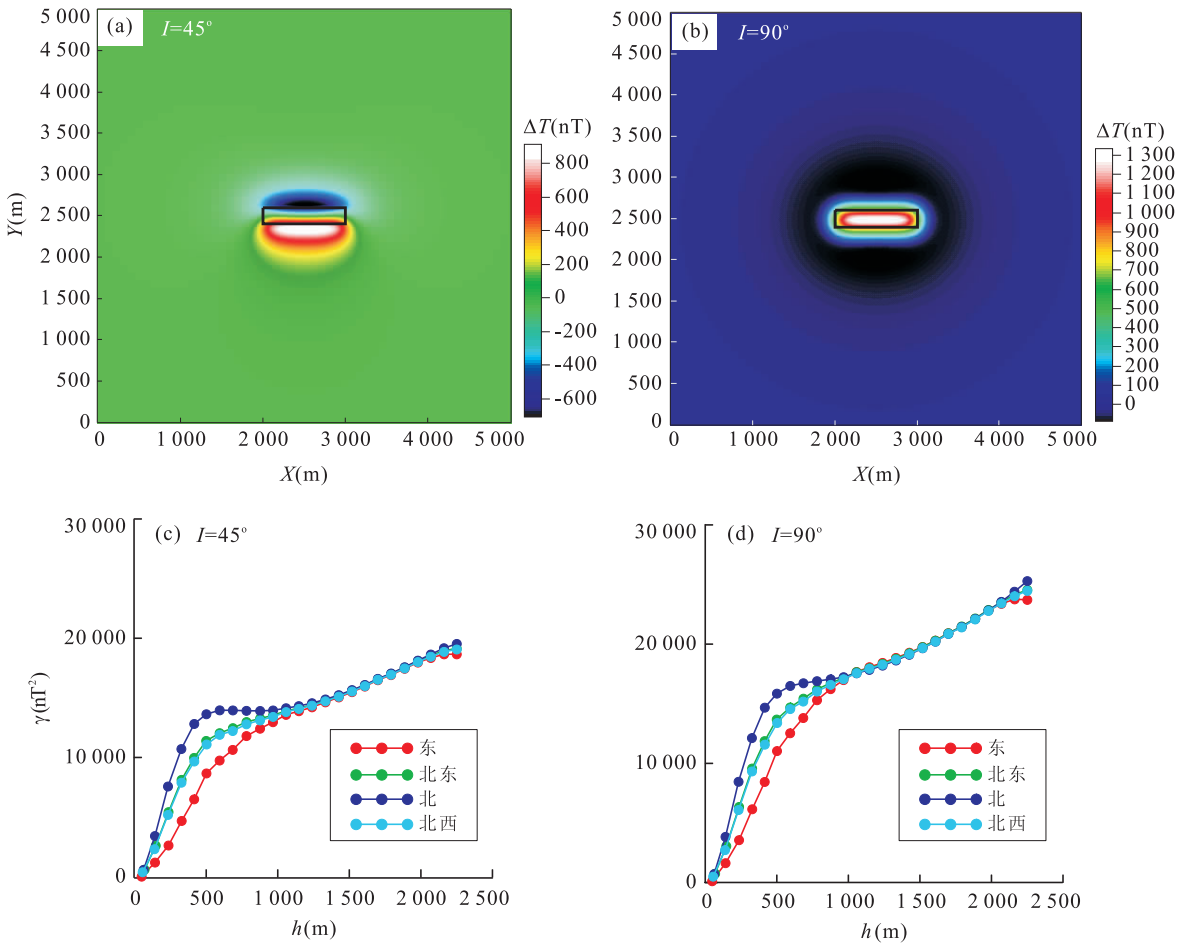


图 2 直立长方体模型的磁场及其变差曲线

Fig. 2 The magnetic fields of cuboid model and the variogram curves

值,磁场的变程大于磁性体本身的几何尺寸,也大于磁性体的埋深.因此,磁场是一种连续性好,相干范围大的区域化变量.

## 2.2 含噪声磁场的变差函数

假设一高斯白噪声信号,其幅值为 500 nT(图 3a).将该高斯噪声添加到图 2a 所示的 45°磁化的长方体模型产生的磁场中,磁异常如图 3b 所示.高斯噪声及含噪声磁场的变差函数分别如图 3c、3d 所示.对比两者的变差函数曲线可以得出:(1)高斯噪声的变差函数为水平曲线,称为纯块金效应.纯块金效应变差函数说明区域化变量任意范围内的信号均是不相干的(图 3c);(2)含高斯噪声的磁场,也存在相同幅值的块金效应(图 3d).磁场的随机干扰的变差函数为一常数.因此,实际中,可以通过磁场变差函数的块金值,分析磁场中的随机干扰特征,为磁测资料去噪提供重要信息;(3)图 3c 与图 2c 变差曲线(红色曲线)之和等于图 3d 变差曲线.反之,可以将图 3d 变差曲线分解为图 3c 纯块金效应变差曲线和

图 2c 变差曲线,该过程称为变差曲线的套合结构.套合结构是把分别出现在不同距离或不同方向上同时起作用的变异性组合起来.套合结构可以表示为多个变差函数之和,每一个变差函数代表一定尺度上的变异特征.图 3d 变差函数由图 3c 和 2c 组成.图 3c 表示微观上的变化性,其变程极小,可以看着浅部随机干扰.图 2c 表示宏观上的变化性,其变程较大,可以看着是深部磁性体引起的磁场.不同尺度的变差函数的变程、块金值及基台值为重磁场的分离提供重要的信息.

## 2.3 不同场源深度的重磁场变差函数

图 4 和图 5 分别是位于不同深度( $D=100\text{ m}$ 、 $200\text{ m}$ 、 $300\text{ m}$ 、 $400\text{ m}$ 、 $500\text{ m}$ 、 $600\text{ m}$ )球体模型的磁场和重力场的变差函数曲线及变差函数一阶导数曲线,磁化强度倾角为  $I=45^\circ$  和  $I=90^\circ$ ,磁化强度偏角为  $0^\circ$ .球体模型的半径为  $R=50\text{ m}$ ,磁化强度为  $M=10\,000\times 10^{-3}\text{ A/m}$ ,剩余密度为  $\rho=1\text{ g/cm}^3$ .变差函数的角度容差为  $90^\circ$ .由图 4 和图 5 可以得出:(1)

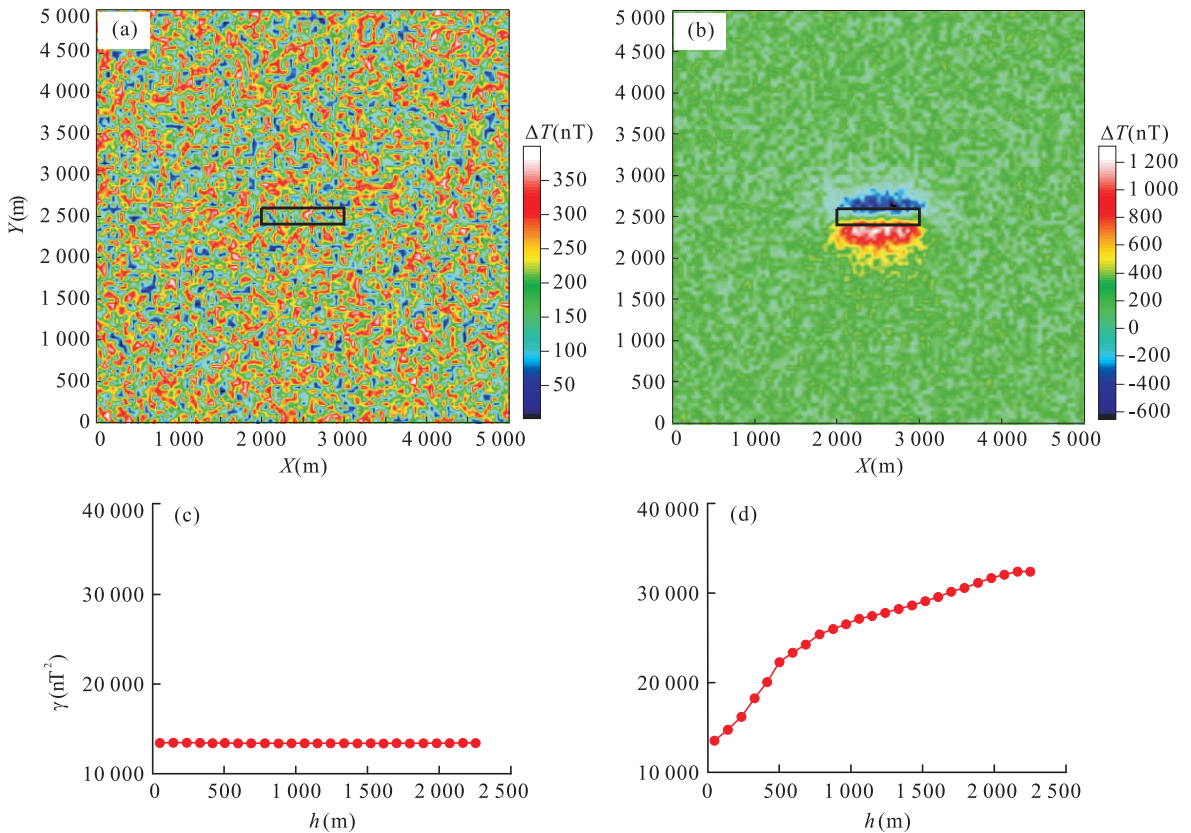


图 3 含噪声磁场的变差函数

Fig. 3 Variogram of magnetic field containing gaussian noise

a. 高斯噪声; b. 含高斯噪声的磁场; c. 高斯噪声的变差函数; d. 含高斯噪声的磁场的变差函数

$I=45^\circ$ 和  $I=90^\circ$ 磁化方向的磁场变差函数形态相似,变程相同,基台值不同(图 4)。两者的变异形式相似,只是变异程度不同。垂直磁化磁场变异程度比斜磁化的变异程度大。变差函数曲线在原点处的切线斜率斜磁化要大于垂直磁化,说明斜磁化磁场的连续性更好,变异程度更弱;(2)浅源、深源磁场变差曲线缓慢上升,均没有明显的水平基台值(图 4),磁场的影响范围很大,大于磁性体的几何尺寸和埋深。浅源磁场变差函数主要为球状模型或指数模型,但随着深度的增加,逐渐变为连续性更好的高斯模型;(3)重磁场的变差曲线基台值不是水平的,其变程不如图 1 中变差曲线直观。如图 4 和图 5 所示,重磁场的变差函数变程可看着是从开始( $h=0$ )到变差函数值平缓变化的这一段距离。同时,变差函数的水平一阶导数( $\partial r/\partial h$ )也能直观地显示变程,有明显的一个波形,波形的宽度即可看成是变差函数变程。联合变差曲线及其一阶水平导数曲线确定的磁场( $I=45^\circ$ )变程和重力场变程如图 4 和图 5 中标注所示;(4)磁场变差函数的变程主要取决于场源的埋深。如表 1 所示,磁性体模型的深度近似等于变程的

一半。实际资料处理中,可以通过变差函数的变程来估计场源的深度;(5)重力场空间相关性比磁场强。对比图 4 和图 5,相同场源深度的重力场变程大于磁场的变程,说明重力场比磁场具有更好的空间连续性。实际上,根据泊松公式,磁场是重力场的一阶导数,磁场随空间位置的衰减比重力场快一个数量级,因此,磁场的相关范围比重力场小;(6)重力场的影响范围很大,变程大于异常体的几何尺寸和埋深(图 5)。如表 1 所示,重力场场源深度近似等于重力场变程的四分之一。随着场源深度的增加,重力场变差函数的变程增加。浅源的重力场为球状模型或指数模型,但随着深度增加,重力场变为高斯模型。

### 3 应用实例:大冶铁矿地面磁测的区域变化特征

大冶铁矿位于湖北省黄石市,是我国重要的铁矿石生产基地。为了在老矿山深部及外围找矿,2004 年该区完成地面高精度  $\Delta T$  磁测。但是,由于老矿山经多年开采,地面建筑以及矿渣等人文干扰十分严

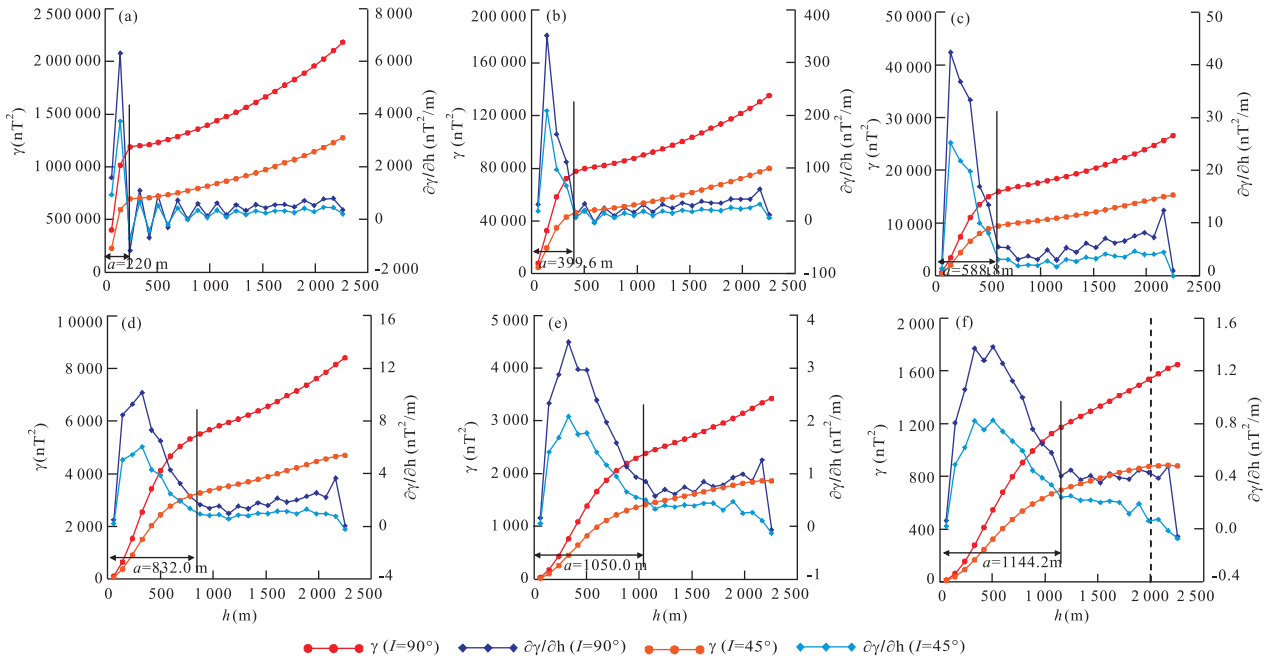


图 4 不同深度球体模型的磁场的变差函数

Fig. 4 Variograms of magnetic fields of sphere models located at different depths

a. 深度 = 100 m; b. 深度 = 200 m; c. 深度 = 300 m; d. 深度 = 400 m; e. 深度 = 500 m; f. 深度 = 600 m

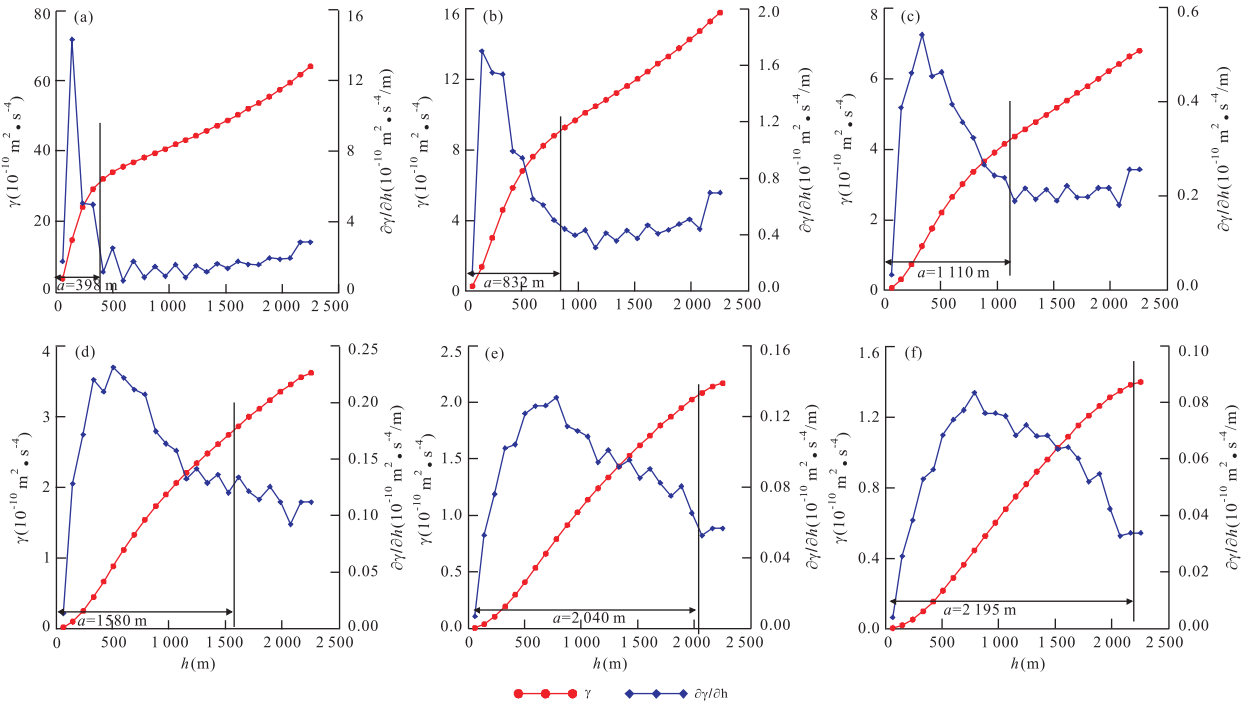


图 5 不同深度球体模型的重力场的变差函数

Fig. 5 Variograms of gravity fields of sphere models located at different depths

a. 深度 = 100 m; b. 深度 = 200 m; c. 深度 = 300 m; d. 深度 = 400 m; e. 深度 = 500 m; f. 深度 = 600 m

表 1 磁场与重力场变差函数变程估计场源的深度结果

Table 1 Estimated depths of field sources using variogram ranges of gravity and magnetic fields

真实深度(m)	100	200	300	400	500	600
磁场估计深度(m)( $I=45^\circ$ )	110.0	199.8	294.4	416.0	525.0	572.1
磁场估计深度(m)( $I=90^\circ$ )	110.0	199.8	294.4	430.4	534.0	574.2
重力场估计深度(m)	99.5	208.0	277.5	395.0	508.0	548.8

重,制约了地面高精度磁测采集的效果(李淑玲等, 2007; 刘天佑等, 2007; Yang *et al.*, 2011). 而 20 世纪 60 年代完成的  $\Delta Z$  磁测(图 6a), 地面干扰小, 而且很多铁矿为尚未开采.  $\Delta T$  和  $\Delta Z$  分别是总磁异常矢量在正常场方向和垂直方向上的投影, 虽然它们的幅值不同, 但  $\Delta T$  和  $\Delta Z$  具有相同的区域结构变化特征. 因此, 本文主要研究大冶铁矿地面  $\Delta Z$  磁异常的区域变化特征.

### 3.1 磁场的各向异性

大冶铁矿属于接触交代型铁矿床, 磁铁矿主要产在大理岩与闪长岩的接触带上, 磁铁矿主要为北西—南东走向, 南西倾向(刘天佑等, 2007). 图 6a 是大冶铁矿区  $\Delta Z$  磁异常图.  $\Delta Z$  异常呈带状分布, 北西—南东走向, 以正异常为主, 幅值达 10 000 nT 以上.  $\Delta Z$  磁异常在东、北东、北、北西 4 个方向上的变差曲线如图 6b 所示. 对比 4 条变差曲线, 可以得出:

(1) 4 个方向上变差曲线的形态基本相似, 为指数模型, 磁场的连续性中等. 4 条曲线的基台值相近, 磁场在各个方向上的变异程度基本相同.

(2) 北、北东方向上的变程最小, 约 500 m; 东、北西方向上的变程较大, 约 600 m. 磁异常具有几何各向异性, 走向为北西—南东, 与磁异常的走向一致.

(3) 磁场的相干范围约 500 m, 推测矿体的平均深度为 250 m, 即主矿体的深度约 250 m, 与实际地质情况吻合.

(4) 变差曲线的块金值为零, 说明磁场的随机干扰小.

### 3.2 磁场的尺度特征

小波多尺度分析是常见的重磁场多尺度分析方法. 它能够将重磁异常精细的分解到各个不同尺度上反映不同深度场源的异常(侯遵泽和杨文采, 1997; 高德章等, 2000). 刘天佑等用小波多尺度分解方法, 对大冶铁矿  $\Delta Z$  磁测做多尺度分析, 并结合功率谱分析方法估计场源深度, 在深部隐伏矿体勘查方面取得较好应用效果(刘天佑等, 2007). 图 7a~7f 是大冶铁矿  $\Delta Z$  磁异常一阶~五阶小波分解的细节部分及五阶逼近部分. 小波多尺度分解的各

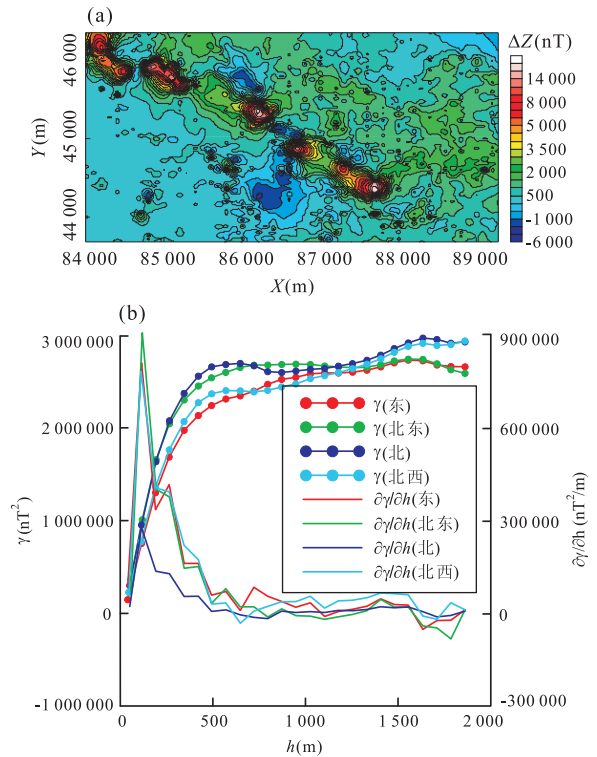


图 6 湖北大冶铁矿  $\Delta Z$  磁异常(a)及其变差函数(b)  
Fig. 6  $\Delta Z$  magnetic anomaly (a) and its variogram (b) of the Daye iron-ore deposit, Hubei

阶细节与逼近表明:

(1) 一阶细节功率谱分析场源似深度 26 m(图 7a, 表 2), 反映露天矿及浅表磁性不均匀以及人文活动干扰(如铁矿开采、钻探等钢铁制品干扰).

(2) 二阶细节场源似深度 144 m(图 7b, 表 2), 三阶细节场源似深度 235 m(图 7c, 表 2). 两者反映地表至 200 多米深铁矿体的磁异常. 这个深度上的小波细节反映的结果与已开采的铁矿吻合较好.

(3) 四阶细节场源似深度 488 m(图 7d, 表 2), 磁异常正负伴生, 正异常幅值大于 1 000 nT, 两侧有负异常伴生, 表明 500 m 左右深度仍有磁性强的铁矿体存在.

(4) 五阶细节场源似深度 912 m(图 7e, 表 2), 西段已经看不出明显局部异常, 推测在 1 000 m 深以下不太可能有铁矿体存在. 而五阶逼近(场源似深度 912 m)为西南负、东北正的磁场特征, 反映大冶

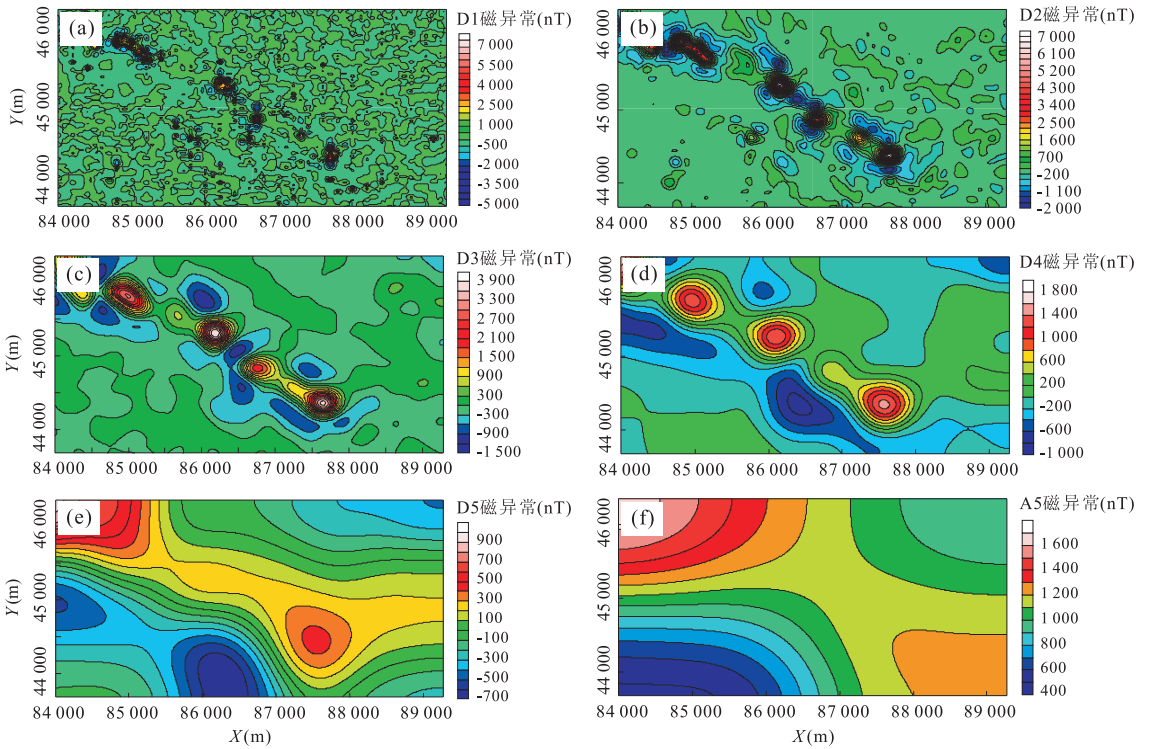


图 7 湖北大冶铁矿  $\Delta Z$  磁异常小波多尺度分解

Fig. 7 Wavelet multi-scale decomposition of  $\Delta Z$  magnetic anomaly of the Daye iron-ore deposit, Hubei

a. 一阶细节; b. 二阶细节; c. 三阶细节; d. 四阶细节; e. 五阶细节; f. 五阶逼近

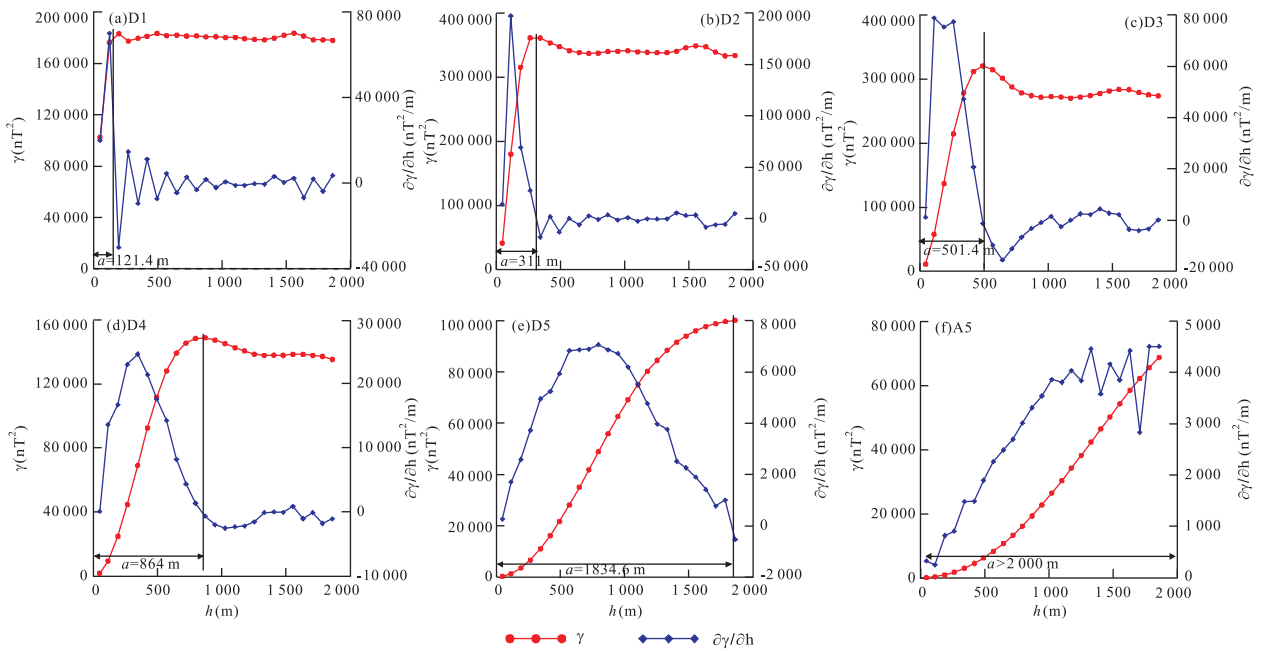


图 8 湖北大冶铁矿地面  $\Delta Z$  磁异常小波多尺度分解细节和逼近部分的变差函数

Fig. 8 Variograms of the details and approximations of the  $\Delta Z$  magnetic anomaly using wavelet multi-scale decomposition of the Daye iron-ore deposit, Hubei

铁矿西南部为无磁性大理岩,而东北部为有磁性的闪长岩体(图 7f,表 2).

为分析小波多尺度分解各阶细节和逼近部分磁

场的区域变化特征及其场源特征,本文计算了一阶~五阶细节及五阶逼近部分的变差函数,变差曲线如图 8 所示.小波分解各阶细节和逼近的变差曲



表 2 变差函数估计的场源深度与功率谱估计的场源深度结果对比

Table 2 Comparisons of estimated depths using variogram and power spectrum

小波分解	D1	D2	D3	D4	D5	A5
功率谱估计深度(m)	26	144	235	488	912	912
变差函数估计深度(m)	60.7	155.5	250.7	432.0	917.3	>1 000

表 3  $\Delta Z$  磁异常小波分解细节和逼近在不同方向的变差函数变程

Table 3 Variogram ranges at different directions of the details and approximations of  $\Delta Z$  magnetic anomalies using wavelet multi-scale decomposition

小波分解	东—西	北东—南西	南—北	北西—南东
D1	160	160	180	200
D2	340	260	280	400
D3	520	460	480	520
D4	920	820	780	820
D5	1 880	1 600	1 720	1 880
A5	—	—	—	—

线说明:(1)一阶细节(D1)变差曲线为球状模型,但变程很小(约 121.4 m),存在块金效应.这说明一阶细节部分磁场在很小的范围内就是不相干的.因此,推测一阶细节磁场主要为浅部随机干扰;(2)二阶~四阶细节(D2、D3、D4)变差曲线为球状模型,变程为 300~900 m,磁场的影响范围适中,推测该部分磁场主要为磁铁矿的反映,磁铁矿深度为 150~450 m;(3)五阶细节(D5)变差曲线为高斯模型,连续性较好,变程约 2 000 m,磁场影响范围大,为深部磁铁矿的反映.五阶逼近(A5)变差曲线连续上升,没有到达基台值,变程大于 2 000 m,磁场的影响范围很大,推测主要为围岩的反映;(4)小波分解各个部分的变差曲线的变程不同,用变程之半估计的场源深度如表 2 所示,表示小波多尺度分解各阶细节和逼近部分磁场所对应的的矿体深度,并且变程估计的深度结果与功率谱估计结果基本吻合,说明变程之半估计磁场场源深度的正确性和有效性(表 2);(5)小波分解细节部分(D1~D5)在东、北东、北、北西方向上的变程如表 3 和图 9 所示.小波分解的各阶细节呈协调的几何各向异性,北西—南东走向.

### 4 结论

本文用变差函数来研究重磁异常的区域变化特征.变差函数的变程反映重磁场的场源深度,块金值反映噪声水平,基台值反映变异程度.计算结果表明:重磁场中的随机干扰为块金效应;重磁场的影

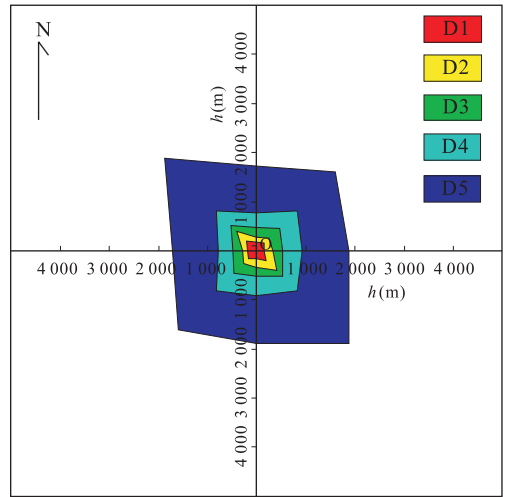


图 9 湖北大冶铁矿  $\Delta Z$  磁异常小波多尺度分解各阶细节在各个方向的变差函数变程

Fig. 9 Variogram ranges at different directions of the details of the  $\Delta Z$  magnetic anomalies using wavelet multi-scale decomposition of the Daye iron-ore deposit, Hubei

范围较大,其变程主要取决于场源的深度,磁场场源的深度近似等于变程的一半,重力场场源的深度近似等于变程的四分之一,重力场的相干范围比磁场大;浅源重磁场的变差函数为球状模型或高斯模型,随着场源深度的增加,变差函数变为连续性更好的高斯模型;垂直磁化时的磁场变异程度大于斜磁化时的变异程度;重磁场存在协调的几何各向异性特征,不存在周期性特征.

变差函数反映了重磁场的空间变化结构特征,而经典统计学中的均值、方差只能反映的是变量的总体特征.其缺点是:通过变差函数的变程、块金值、基台值只能定性或半定量的反映重磁场特征,不能完全定量反映重磁场和场源的参数;通过变程获得的深度是场源的平均深度,当多个场源存在时,需首先进行位场分离.

### References

Bhattacharyya, B. K., 1966. Continuous Spectrum of the Total-Magnetic-Field Anomaly Due to a Rectangular Prismatic Body. *Geophysics*, 31(1): 97-121.

- Chilès, J. P., Guillen, A., 1984. Variogrammes et Krigeages Pour la Gravimétrie et le Magnétisme. *Sciences de la Terre, Série Informatique*, 20(1): 455—468 (in France).
- Gao, D. Z., Hou, Z. Z., Tang, J., 2000. Multiscale Analysis of Gravity Anomalies on East China and Adjacent Regions. *Chinese Journal of Geophysics*, 43(6): 842—849 (in Chinese with English abstract).
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Hou, Z. Z., Yang, W. C., 1997. Wavelet Transform and Multi-Scale Analysis on Gravity Anomalies of China. *Acta Geophysica Sinica*, 40(1): 85—95 (in Chinese with English abstract).
- Hu, G. D., 1985. Applications of Variogram in Mineral Prospecting. *Geological Science and Technology Information*, 4(4): 125—133 (in Chinese).
- Journal, A. G., Huijbregts, C. J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- Li, S. L., Meng, X. H., Fang, Z. G., et al., 2007. Application of Fine Gravity and Magnetic Data Processing and Interpretation in the Prospecting of Crisis Mines. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(4): 559—563 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. G., Yang, S. L., Shao, X. J., et al., 2011. Application of Variogram in Reservoir Evaluation and Development: Taking Yangjiaba Oilfield for Example. *Geological Science and Technology Information*, 30(4): 83—87 (in Chinese with English abstract).
- Liu, T. Y., Wu, Z. C., Zhan, Y. L., et al., 2007. Wavelet Multi-Scale Decomposition of Magnetic Anomaly and Its Application in Searching for Deep-Buried Minerals in Crisis Mines: A Case Study from Daye Iron Mines. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(1): 135—140 (in Chinese with English abstract).
- Matheron, G., 1971. *The Theory of Regionalized Variables and Its Application*. Centre of Geostatistics Fontainebleau, Fontainebleau.
- Pei, T., Zhou, C. H., Li, Q. L., et al., 2002. Quantitative Computation on Temporal Relativity of Earthquakes Based on Semi-Variogram Analysis. *Earthquake*, 22(2): 17—21 (in Chinese with English abstract).
- Sun, H. Q., 1990. *Geostatistics and Applications*. China University of Mining & Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Tang, S. H., Xue, Y. X., Zou, J. K., et al., 1985. Application of the Factor Kriging Analysis in Interpretation of Airborne Magnetic Data. *Uranium Geology*, 1(6): 27—34 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L. H., Chen, X. S., Jiang, Y., et al., 2012. A Comparative Analysis of Stochastic Inversion and Stochastic Simulation on Different Ranges of Variograms. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 36(2): 224—227, 233 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y., Qu, S. L., Yin, X. Y., 2007. Using Spatial Filtering for Denoise of Horizon-Oriented Seismic Attributes Data. *Oil Geophysical Prospecting*, 42(2): 208—211 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. S., Li, Y. Y., Liu, T. Y., et al., 2011. Interactive 3D forward Modeling of Total Field Surface and Three-Component Borehole Magnetic Data for the Daye Iron-Ore Deposit (Central China). *Journal of Applied Geophysics*, 75(2): 254—263.

#### 附中文参考文献

- 高德章, 侯遵泽, 唐建, 2000. 东海及邻区重力异常多尺度分解. *地球物理学报*, 43(6): 842—849.
- 侯遵泽, 杨文采, 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. *地球物理学报*, 40(1): 85—95.
- 胡光道, 1985. 变差函数在矿床勘探中的应用. *地质科技情报*, 4(4): 125—133.
- 李淑玲, 孟小红, 范正国, 等, 2007. 危机矿山重磁资料精细处理与解释: 以湖北省大冶铁矿为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(4): 559—563.
- 李武广, 杨胜来, 邵先杰, 等, 2011. 变差函数在储层评价及开发中的应用: 以杨家坝油田为例. *地质科技情报*, 30(4): 83—87.
- 刘天佑, 吴招才, 詹应林, 等, 2007. 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(1): 135—140.
- 裴韬, 周成虎, 李全林, 等, 2002. 基于变差函数分析的地震时间相关性定量估算. *地震*, 22(2): 17—21.
- 孙洪泉, 1990. *地质统计学及其应用*. 北京: 中国矿业大学出版社.
- 唐声喧, 薛禹选, 邹景柯, 等, 1985. 因子克立格法在解析航磁资料中的应用. *铀矿地质*, 1(6): 27—34.
- 徐立恒, 陈显森, 姜岩, 等, 2012. 不同变差函数变程下随机反演与随机模拟对比分析. *物探与化探*, 36(2): 224—227, 233.
- 杨阳, 曲寿利, 印兴耀, 2007. 沿层地震属性数据空间滤波去噪方法. *石油地球物理勘探*, 42(2): 208—211.