

郭良辉, 孟小红, 石磊等. 重力和重力梯度数据三维相关成像. 地球物理学报, 2009, 52(4): 1098~1106, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.027

Guo L H, Meng X H, Shi L, et al. 3-D correlation imaging for gravity and gravity gradiometry data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 1098~1106, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.027

重力和重力梯度数据三维相关成像

郭良辉^{1,2,3}, 孟小红^{1,3*}, 石磊³, 李淑玲³

1 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

2 中国科学院边缘海地质重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301

3 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学, 北京), 北京 100083

摘 要 本文提出了重力异常三维相关成像方法和重力梯度数据三维相关成像方法, 并提出了基于异常分离的三维相关成像方法来提高成像分辨率. 通过合成 Y 型岩脉模型和合成多个直立长方体组合模型的重力异常和重力梯度数据试验分析, 验证了本文三维相关成像方法可显示出异常地质体的空间赋存状态和等效剩余质量分布, 具有良好的纵向和横向分辨率.

关键词 重力异常, 重力梯度数据, 三维相关成像, 基函数

DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.027

中图分类号 P631

收稿日期 2008-07-20, 2009-03-20 收修定稿

3-D correlation imaging for gravity and gravity gradiometry data

GUO Liang-Hui^{1,2,3}, MENG Xiao-Hong^{1,3*}, SHI Lei³, LI Shu-Ling³

1 State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 CAS Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

3 Key Laboratory of Geo-detection (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China

Abstract We propose the 3-D correlation imaging for gravity anomaly and for gravity gradiometry data. We also propose to use the 3-D correlation imaging based on anomaly separation to improve the imaging resolution. The test with the gravity anomalies and gravity gradiometry data of the synthesized Y-type dyke and multiple rectangular prism models shows that the method can image the spatial extension states and the distribution of equivalent excess masses of anomalous geological bodies with high resolution both longitudinally and transversely.

Keywords Gravity anomaly, Gravity gradiometry data, 3-D correlation imaging, Basic function

1 引 言

重力勘探方法在区域地质调查、成矿远景区划分评价、水文及工程地质勘察等方面已经正在发

挥着重要的作用. 常规重力测量只观测到重力位的铅垂一次导数, 即 Δg 或 U_z , 而重力梯度测量可以得到重力位的一次导数 G_x, G_y, G_z 在 x, y, z 方向上的变化率, 即重力位的二次导数, 如 $G_{xx}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yy}, G_{yz}$ 和 G_{zz} ^[1]. 重力梯度异常反映了地下密度突

基金项目 国家 863 计划(2006AA06Z111, 2006AA06A201-3, 2006AA09A101-0201-3)、中国科学院边缘海地质重点实验室基金(MSGL0707)、地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(GPMR0733)联合资助.

作者简介 郭良辉, 男, 1980 年生, 讲师, 2006 年在中国地质大学(北京)获工学硕士学位, 现在该校在职攻读博士学位, 从事勘探地球物理学领域的教学和科研工作. E-mail: guo_lianghui@163.com

* **通信作者** 孟小红, 女, 1958 年生, 教授, 1991 年在中国地质大学(北京)获工学博士学位, 从事勘探地球物理学领域的教学和科研工作. E-mail: mxh@cugb.edu.cn

变引起的重力异常中的变化,突出场源体的细节,具有比重力异常本身高的分辨率,综合利用各梯度张量分量信息能够提高地质解释的准确性。

常规重力/重力梯度异常反演方法是基于反演理论、在最小二乘意义下使目标函数达到极小的线性或非线性反演。几十年来,国内外众多学者^[2~18]对重力/重力梯度反演方法和算法作了较多的研究与应用。由于重力/重力梯度异常反演在数学上呈病态,具有固有的多解性,需引入先验约束条件,计算维数巨大、计算量庞大,这些问题都制约着其反演效果和实际应用。近年来, Li 等^[19]、Portniaguine 等^[20]、Silva 等^[21]、姚长利等^[22,23]提出了一些改进方法和措施,在一定程度上改善了反演效果和效率。

1997年由 Patella^[24]首次提出将概率成像方法用于自然电位异常的解释, Mauriello 等^[25]将这种方法推广应用于大地电磁法, Mauriello 等^[26]又推广到了重力领域。Iuliano 等^[27]在任意标量和矢量的地球物理场概率成像基础上,又定义了联合概率成像的概念,并利用重力和磁力、重力和自然电位、磁力和自然电位对维苏威火山进行了联合三维概率成像研究,清晰地勾画出了火山岩浆通道系统,为维苏威火山活动性的认识提供了重要的三维成像依据。国内许令周等^[28]、王绪本等^[29]、毛立峰等^[30]等利用概率成像方法对自然电场和大地电磁数据进行了研究,取得了一些进展和认识。

本文在前人工作的基础上,提出了重力异常三维相关成像方法原理及重力梯度数据三维相关成像方法原理,并提出了基于异常分离(平均值滤波)的平面重力数据三维相关成像算法来提高成像分辨率。利用本文方法对合成岩脉模型和合成多个直立长方体组合模型的重力异常和重力梯度数据进行了试验分析,以验证本文方法的有效性。

2 方法原理

2.1 重力异常三维相关成像

在地形起伏的测区,笛卡儿坐标的 (x, y) 平面在基准面上, z 取垂直向下为正,假设测区地下任意坐标为 (x_q, y_q, z_q) 、体积为 v_q 的第 q 个点质量的剩余密度为 $\Delta\sigma_q$,则它在测区上任意点 (x, y, z) 处的重力异常 $\Delta g_q(x, y, z)$ 可表示为

$$\Delta g_q(x, y, z) = \frac{G\Delta\sigma_q v_q (z_q - z)}{[(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + (z_q - z)^2]^{3/2}}, \quad (1)$$

其中,万有引力常数 $G=6.667 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ 。

借鉴 Abdelrahman 等^[31]的相邻最小二乘剩余异常的归一化互相关公式,我们定义测区上实测重力异常与第 q 个点质量在测区上的重力异常的归一化互相关为

$$C_q = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta g(x_i, y_i, z_i) \Delta g_q(x_i, y_i, z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta g^2(x_i, y_i, z_i) \sum_{i=1}^N \Delta g_q^2(x_i, y_i, z_i)}}, \quad (2)$$

其中, (x_i, y_i, z_i) 为测区第 i 个观测点的坐标, $\Delta g(x_i, y_i, z_i)$ 为该观测点的实测重力异常, $\Delta g_q(x_i, y_i, z_i)$ 为地下第 q 个点质量在该观测点的重力异常, N 为测区观测点总数。

假设 $\Delta\sigma_q > 0$, 则将公式(1)代入公式(2)可得

$$C_q = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta g(x_i, y_i, z_i) B_q(x_i, y_i, z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \Delta g^2(x_i, y_i, z_i) \sum_{i=1}^N B_q^2(x_i, y_i, z_i)}}, \quad (3)$$

其中,

$$B_q(x_i, y_i, z_i) = \frac{(z_q - z_i)}{[(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + (z_q - z)^2]^{3/2}}, \quad (4)$$

我们称 $B_q(x_i, y_i, z_i)$ 为第 q 个点质量的基函数。

根据 Schwarz 不等式可知,

$$\left[\sum_{i=1}^N \Delta g(x_i, y_i, z_i) B_q(x_i, y_i, z_i) \right]^2 \leq \sum_{i=1}^N \Delta g^2(x_i, y_i, z_i) \sum_{i=1}^N B_q^2(x_i, y_i, z_i), \quad (5)$$

因此,公式(3)的相关系数 C_q 的数值范围为 $-1 \leq C_q \leq +1$ 。

从公式(3)可见,测区上实测重力异常与第 q 个点质量在测区上的重力异常的归一化互相关实质上是实测重力异常与第 q 个点质量的基函数的归一化互相关。相关系数 C_q 表征实测重力异常与点质量基函数的相关性程度,其值的意义是重力异常是由第 q 个点质量产生的可能性。 C_q 值为正,说明该点质量盈余;反之, C_q 值为负,说明该点质量亏损。 C_q 值越接近于 1,表明该点质量剩余的可能性越大;反之, C_q 值越接近于 -1,表明该点质量亏损的可能性越大。

将地下待成像的空间剖分成均匀网格,然后根据公式(3)从地下浅层到深层计算所有网格节点的相关系数,即实现对重力异常的三维成像,我们称这种成像方法为三维相关成像,成像结果表征地下异常地质体的空间赋存状态和等效剩余质量情况。

对比上述重力异常三维相关成像方法和

Mauriello^[25]的重力异常概率成像方法可见,上述公式(4)的基函数与 Mauriello 所定义的空间扫描函数是一致的,公式(3)的归一化互相关与 Mauriello 所定义的剩余质量发生函数类似,且意义是一致的。

2.2 重力梯度数据三维相关成像

上述重力异常三维相关成像原理很容易推广到重力梯度数据上。

重力矢量是重力位的一阶空间导数,而重力矢量的梯度是重力位的二阶空间导数,重力梯度张量由 9 个重力梯度分量构成:

$$\hat{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} G_{xx} & G_{xy} & G_{xz} \\ G_{yx} & G_{yy} & G_{yz} \\ G_{zx} & G_{zy} & G_{zz} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,重力梯度分量

$$G_{\alpha\beta} = \frac{\partial^2 G}{\partial\alpha\partial\beta}, \quad \alpha, \beta = x, y, z. \quad (7)$$

根据场论可知, $G_{xy} = G_{yx}$, $G_{xz} = G_{zx}$, $G_{yz} = G_{zy}$, $G_{xx} + G_{yy} + G_{zz} = 0$. 因此,重力梯度张量的 9 个分量中仅有 5 个是独立的。

根据上述重力异常三维相关成像原理,同理可推导出各重力梯度分量 $G_{\alpha\beta}$ 的归一化互相关公式:

$$C_{\alpha\beta,q} = \frac{\sum_{i=1}^N G_{\alpha\beta}(x_i, y_i, z_i) B_{\alpha\beta,q}(x_i, y_i, z_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N G_{\alpha\beta}^2(x_i, y_i, z_i) \sum_{i=1}^N B_{\alpha\beta,q}^2(x_i, y_i, z_i)}}, \quad \alpha, \beta = x, y, z, \quad (8)$$

其中,

$$B_{xx,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{2(x_q - x_i)^2 - (y_q - y_i)^2 - (z_q - z_i)^2}{[(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2 + (z_q - z_i)^2]^{5/2}},$$

$$B_{yy,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{2(y_q - y_i)^2 - (x_q - x_i)^2 - (z_q - z_i)^2}{[(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2 + (z_q - z_i)^2]^{5/2}},$$

$$B_{zz,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{2(z_q - z_i)^2 - (x_q - x_i)^2 - (y_q - y_i)^2}{[(x_q - x_i)^2 + (y_q - y_i)^2 + (z_q - z_i)^2]^{5/2}},$$

$$B_{xy,q}(x_i, y_i, z_i) = B_{yx,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{3(x_q - x)(y_q - y)}{[(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + (z_q - z)^2]^{5/2}},$$

$$B_{xz,q}(x_i, y_i, z_i) = B_{zx,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{3(x_q - x)(z_q - z)}{[(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + (z_q - z)^2]^{5/2}},$$

$$B_{yz,q}(x_i, y_i, z_i) = B_{zy,q}(x_i, y_i, z_i) = \frac{3(y_q - y)(z_q - z)}{[(x_q - x)^2 + (y_q - y)^2 + (z_q - z)^2]^{5/2}}.$$

利用公式(8)可进行各重力梯度分量的三维相关成像。

3 基于异常分离的三维相关成像

为了提高反演或成像的纵向(深度)分辨率, Fedi 等^[10]提出了对位场异常做不同高度向上延拓得到相应高度的延拓场,然后对位场异常和延拓场做联合反演,数值试验表明该方法可提高反演的深度分辨率. 阮帅等^[32]提出了基于正则化下延的全空间概率成像法,通过正则化下延得到地下半空间完整场值,再对各深度处场值做相应深度下半空间的概率成像,最后归一化叠加处理,数值试验表明改进后的方法效果优于常规方法. 王绪本等^[33]提出基于正则化下延的重磁概率成像法,通过正则化下延得到地下半空间完整场值,再识别出各深度处场值有意义的数段并上延到地表进行概率成像,最后汇总各成像数据,数值试验表明改进后的方法效果优于常规方法. 徐世浙等^[34]提出切割法分离出不同深度层源异常并用大深度下延迭代法下延到相应深度上,再利用平板公式反演异常为视密度,数值试验表明该方法反演快速,效果明显。

本文提出基于异常分离的三维相关成像算法来提高平面重力异常或重力梯度数据成像的纵向分辨率. 当前重力异常分离方法众多,本文采用简单的空间域平均值滤波. 其基本原理是:在平面窗口范围内的区域异常可视为线性变化,因而该窗口范围的重力异常平均值可视为窗口中心点处的区域异常值,由该点的实测重力异常减去区域异常即得剩余异常;求平均异常时所选用的窗口范围应当大于局部异常的范围. 利用小窗口平均值滤波得到的剩余异常主要反映了浅部场源在地表的重力效应,而利用大窗口平均值滤波得到的剩余异常不仅反映了浅部场源在地表的重力效应,也反映了更深部场源在地表的重力效应. 因此,对平均值滤波的剩余异常进行三维相关成像,将提高成像的纵向分辨率。

这里,我们采用平均值滤波和三维相关成像动态结合,即随着三维相关成像从地下浅层逐步到深层进行时,平均值滤波的窗口大小也从小到大逐步增加,浅层三维相关成像的平均值滤波窗口较小,而深层三维相关成像的平均值滤波窗口较大,对每深度层相应窗口大小的平均值滤波剩余异常进行该深度层三维相关成像. 下面的合成多个直立长方体模

型数据试验将验证该方法改善成像分辨率的有效性。

4 合成模型数据试验

合成模型一为南北走向的 Y 型岩脉模型,该模型被 Li^[9]、姚长利等^[23]等多位研究者用来试验重力数据三维反演方法。图 1(a)、(b)和(c)分别显示了合成模型一在地下 120 m 深度切片、A-A' 断面(1b)

和 B-B' 断面(1c)上的位置分布。该模型左侧浅色岩脉走向短,延伸浅,剩余密度为 800 kg/m³,右侧深色岩脉走向长,延伸深,剩余密度为 1000 kg/m³,左右两个岩脉反向倾斜。数值正演该模型在深度为 0 m 处、测网为 101×101、纵横向网格间距均为 10 m 的平面网格上的理论重力异常和重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} ,并附加信噪比为 2% 的高斯随机干扰。图 1(d,e,f)和(g)分别显示了重力异常和重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} 的等值线图。

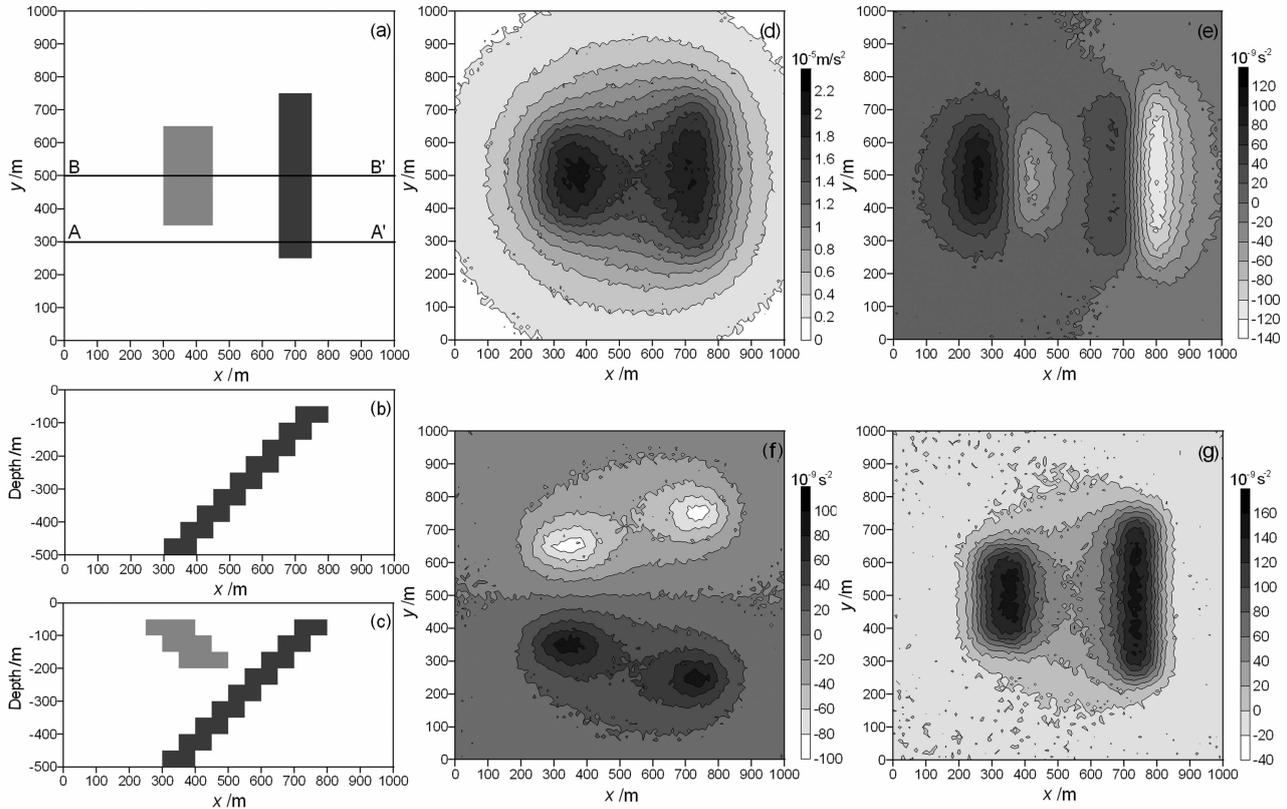


图 1 合成模型一切片图及模型的重力异常和重力梯度异常(含 2% 高斯随机噪声)等值线图
(a) 地下 120 m 深度切片; (b) A-A' 断面切片; (c) B-B' 断面切片; (d) 重力异常; (e) G_{zx} 异常; (f) G_{zy} 异常; (g) G_{zz} 异常。

Fig. 1 The slice maps of the synthesized model I and the contour maps of its gravity anomaly and its gravity gradiometry anomalies with the uncorrelated Gaussian noise of 2% of the datum magnitude

(a) In the depth slice of 120 m; (b) In the panel A-A'; (c) In the panel B-B'; (d), (e), (f) and (g) are the contour maps of the gravity anomaly, G_{zx} , G_{zy} , and G_{zz} respectively.

分别对合成模型一的重力异常和重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} 作三维相关成像,成像深度范围为 0~500 m,深度步长为 20 m。图 2(a~c)显示了重力异常三维相关成像分别在地下 120 m 深度切片、A-A' 断面和 B-B' 断面上的结果,它能成像出 Y 型岩脉的大致空间分布,但不能分辨出岩脉的陡度和浅部形态的细节,相关值为正表明岩脉质量盈余。图 2(d~f)显示了重力梯度异常 G_{zx} 三维相关成像分别在地下 120 m 深度切片、A-A' 断面和 B-B' 断面上的结果,

它的分辨率明显提高了,能成像出 Y 型岩脉的空间和等效剩余质量分布。图 2(g~i)显示了重力梯度异常 G_{zy} 三维相关成像分别在地下 120 m 深度切片、A-A' 断面和 B-B' 断面上的结果,它的分辨率较重力异常三维相关成像有所提高,但较 G_{zx} 三维相关成像的差些。图 2(j~l)显示了重力梯度异常 G_{zz} 三维相关成像分别在地下 120 m 深度切片、A-A' 断面和 B-B' 断面上的结果,它的分辨率明显提高了,较好地成像出岩脉的空间和等效剩余质量分布。可见,重力

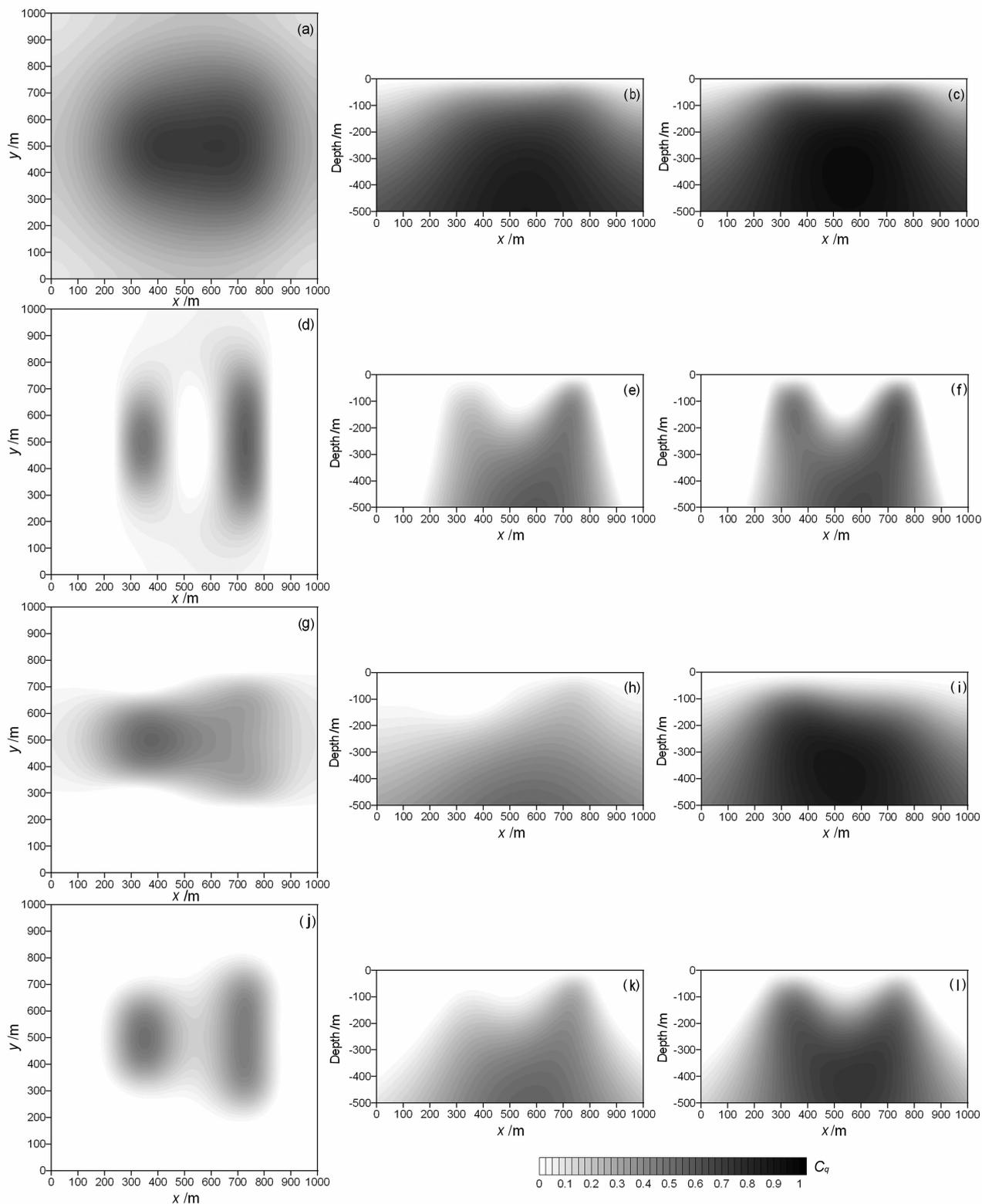


图 2 合成模型—重力和重力梯度数据三维相关成像结果

重力异常三维相关成像结果图:(a) 120 m 深度切片;(b) A-A' 断面切片;(c) B-B' 断面切片;重力梯度异常 G_{xx} 三维相关成像结果图:(d) 120 m 深度切片,(e) A-A' 断面切片,(f) B-B' 断面切片;重力梯度异常 G_{zy} 三维相关成像结果图:(g) 120 m 深度切片,(h) A-A' 断面切片,(i) B-B' 断面切片;重力梯度异常 G_{zz} 三维相关成像结果图:(j) 120m 深度切片,(k) A-A' 断面切片,(l) B-B' 断面切片.

Fig. 2 The 3-D correlation imaging of the gravity and gravity gradiometry data of the synthesized model I
 The 3-D correlation imaging of gravity anomaly: (a) In the depth slice of 120 m, (b) In the panel A-A', (c) In the panel of B-B'; the 3-D correlation imaging of G_{xx} : (d) In the depth slice of 120 m, (e) In the panel A-A', (f) In the panel of B-B'; the 3-D correlation imaging of G_{zy} : (g) In the depth slice of 120 m, (h) In the panel A-A', (i) In the panel of B-B'; the 3-D correlation imaging of G_{zz} : (j) In the depth slice of 120m, (k) In the panel A-A', (l) In the panel of B-B'.

梯度异常具有比重力异常本身高的分辨率,重力梯度异常三维相关成像具有比重力异常三维相关成像高的分辨率。

合成模型二由处于三个不同深度层的大小和剩余密度各异的 11 个直立长方体组成,各长方体的几何参数和剩余密度见表 1 所示。图 3(a,b)显示了各直立长方体在水平面的投影分布和在 $Y=8000$ m 断面上的分布,其中形体最大的长方体 A1、A2 和

A3 处于最深层,长方体 B1、B2、B3、B4 和 B5 处于中间层,形体最小的长方体 C1、C2 和 C3 处于最浅层。数值正演该模型在深度为 0 m 处、测网为 101×101 、纵横向网格间距均为 200 m 的平面网格上的理论重力异常和重力梯度异常。图 3c 显示了理论重力异常等值线图。由于篇幅有限,这里不绘制理论重力梯度异常等值线图。

表 1 合成模型二的各长方体几何参数和剩余密度

Table 1 Geometric parameters and density contrast of each prism in the synthesized model II

长方体序号	沿 X 长度(m)	沿 Y 宽度(m)	沿 Z 深度(m)	上顶深度(m)	剩余密度($\times 10^{-3}$ kg/m ³)
A1	4000	5000	1500	1500	0.15
A2	3000	7000	1500	1500	-0.1
A3	1500	3300	1500	1500	0.1
B1	400	1600	400	400	-0.25
B2	400	1000	400	400	0.25
B3	600	800	400	400	0.25
B4	600	900	400	400	0.25
B5	600	2400	400	400	-0.25
C1	100	200	100	100	0.5
C2	100	200	100	100	-0.5
C3	100	100	100	100	0.5

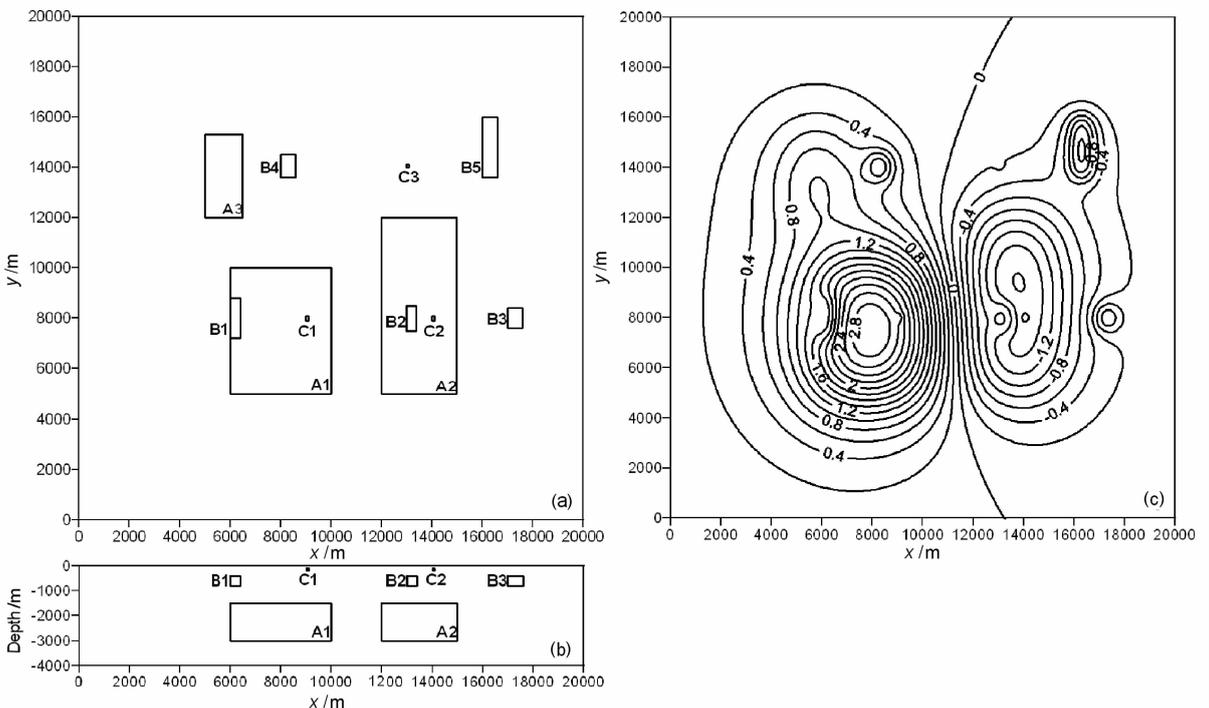


图 3 合成模型二各长方体平面投影图(a)和在 $Y=8000$ m 断面切片图(b),及其理论重力异常等值线图(c)。等值线间距为 $0.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$

Fig. 3 The projection of each prism of the synthesized model II on the XOY surface (a) and the slice of the model in the XOZ panel at $Y=8000$ m (b), and the contour map of its theoretical gravity anomaly (c). The contour interval is $0.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$.

分别对合成模型二的理论重力异常和重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} 作三维相关成像, 成像深度范围为 $0 \sim 3000$ m, 深度步长为 120 m, 图 4a 显示了重力异常三维相关成像在 $Y=8000$ m 断面上的结果, 它能成像出深层长方体 A1 和 A2 的空间和等效剩余质量分布, 左测相关值为正表明质量盈余, 右测相关值为负表明质量亏损; 但未能成像出中间层长方体

B1、B2 和 B3 及浅层长方体 C1 和 C2 的空间和等效剩余质量分布. 图 4(b, c, d) 分别显示了 G_{zx} 、 G_{zy} 和 G_{zz} 三维成像在 $Y=8000$ m 断面上的结果, 它们对深层长方体 A1 和 A2 与中间层长方体 B1、B2 和 B3 成像良好, 但浅层长方体 C1 和 C2 成像还是不够理想. 可见, 重力梯度异常三维相关成像的分辨率均高于重力异常三维相关成像.

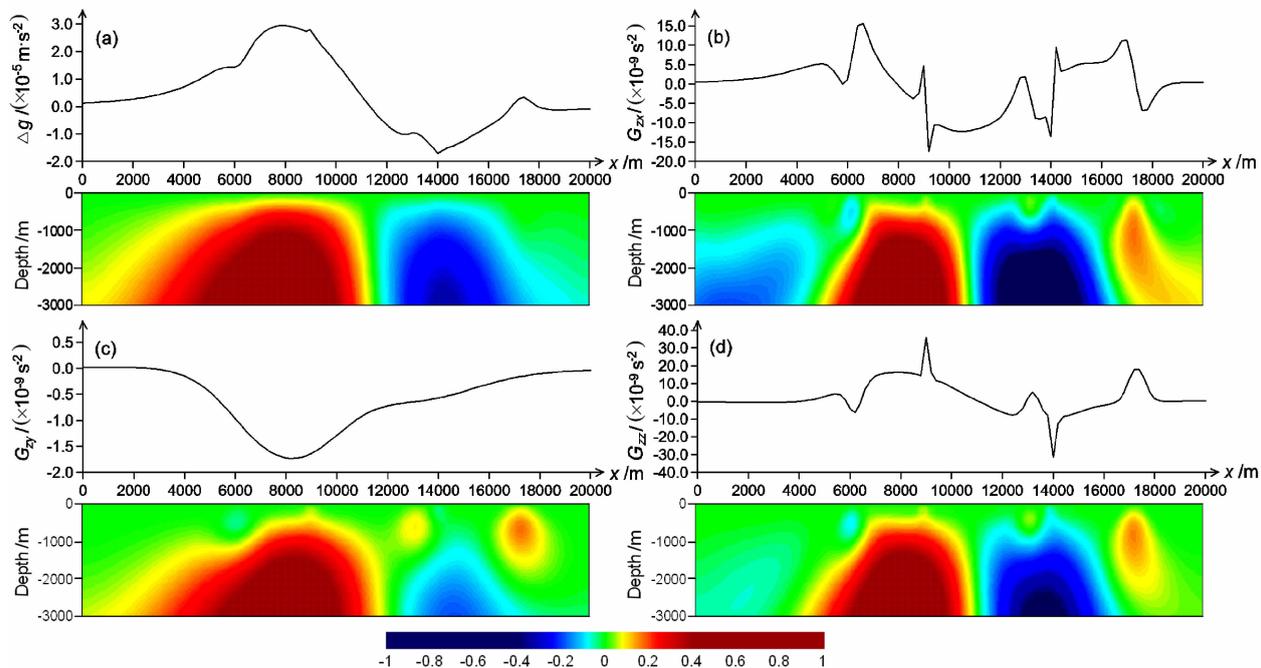


图 4 合成模型二重力异常和重力梯度异常三维相关成像在 $Y=8000$ m 断面上的结果

(a) 重力异常及其三维成像结果; (b)、(c) 和 (d) 分别是重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} 及其三维成像结果.

Fig. 4 The result of the 3-D correlation imaging of the gravity anomaly and the gravity gradiometry anomalies of the synthesized model II in the XOZ panel at $Y=8000$ m.

(a) The gravity anomaly and its 3-D imaging, (b), (c) and (d) are the gravity gradiometry anomalies G_{zx} , G_{zy} and G_{zz} and their 3-D imaging, respectively.

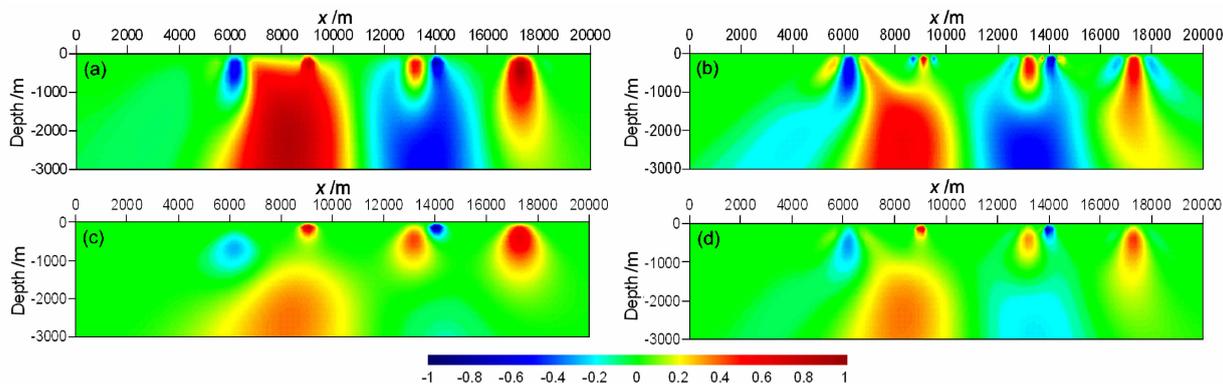


图 5 合成模型二重力异常和重力梯度异常基于异常分离的三维相关成像在 $Y=8000$ m 断面上的结果

(a) 重力异常三维成像结果; (b)、(c) 和 (d) 分别是重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} 三维成像结果.

Fig. 5 The result of the 3-D correlation imaging based on anomaly separation of the synthesized model II in the XOZ panel at $Y=8000$ m

(a) The 3-D imaging of the gravity anomaly, (b), (c) and (d) are the 3-D imaging of the gravity gradiometry anomalies G_{zx} , G_{zy} and G_{zz} respectively.

分别对合成模型二理论重力异常和重力梯度异常 G_{zx} 、 G_{zy} 、 G_{zz} 作基于平均值滤波分离异常的三维相关成像,成像深度范围为 0~3000 m,深度步长为 120 m.图 5a 显示了重力异常三维相关成像在 $Y=8000$ m 断面上的结果,它的成像分辨率明显提高,能同时成像出深层、中间层和浅层各长方体的空间和等效剩余质量分布.图 5(b,c,d)分别显示了 G_{zx} 、 G_{zy} 和 G_{zz} 三维成像在 $Y=8000$ m 断面上的结果,它们的成像分辨率都明显提高,均较清晰成像出深层、中间层和浅层各长方体的空间和等效剩余质量分布,同理论吻合很好.可见,基于异常分离的三维相关成像能有效提高重力异常和重力梯度异常三维成像的分辨率.

5 结论与建议

(1)本文在前人工作的基础上,提出了重力异常三维相关成像方法和重力梯度数据三维相关成像方法,并提出了基于异常分离的三维相关成像方法来提高成像分辨率.

(2)本文方法无须在常规反演中给出初始模型和正反演的迭代拟合过程,成像过程中不需要任何先验信息约束,方法简单,容易实现,计算稳定.

(3)合成模型重力异常和重力梯度数据试验分析表明,本文方法能成像出地下异常地质体的空间赋存状态和等效剩余质量分布,其中,重力梯度数据三维相关成像的分辨率要比重力异常三维相关成像的明显提高,基于异常分离的三维相关成像算法能明显提高成像的分辨率,因此,本文方法是有效的,有较大的应用前景.

(4)综合利用重力异常三维相关成像结果和重力梯度各分量三维相关成像结果能够提高地质解释的准确性.若实际资料只有实测重力异常而没有实测重力梯度数据,则可应用理论公式或频率域方法,把重力异常变换为各次导数,再进行重力异常和各次导数三维相关成像综合解释.

(5)本文方法仅作了合成模型数据试验验证,需要进一步作实际重力资料试验验证.

参考文献(References)

- [1] 曾华霖.重力梯度测量的现状及复兴.物探与化探,1999,23(1):1~6
Zeng H L. Present state and revival of gravity gradiometry. *Geophysical & Geochemical Exploration* (in Chinese), 1999, 23(1):1~6
- [2] Oldenburg D W. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 1974, 39:394~408
- [3] Green W R. Inversion of gravity profiles by use of a Backus-Gilbert approach. *Geophysics*, 1975, 40:763~772
- [4] Last B J, Kubik K. Compact gravity inversion. *Geophysics*, 1983, 48:713~721
- [5] Guillen A, Menichetti V. Gravity and magnetic inversion with minimization of a specific functional. *Geophysics*, 1984, 49:1354~1360
- [6] Barbosa V C F, Silva J B C. Generalized compact gravity inversion. *Geophysics*, 1994, 59:57~68
- [7] Bear G W, Al-Shukri H J, Rudman A J. Linear inversion of gravity data for 3-D density distributions. *Geophysics*, 1995, 60:1354~1364
- [8] 管志宁,侯俊胜,黄临平等.重磁异常反演的拟 BP 神经网络方法及其应用.地球物理学报,1998,41(2):242~251
Guan Z N, Hou J S, Huang L P, et al. Inversion of gravity and magnetic anomalies using pseudo BP neural network method and its application. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1998, 41(2):242~251
- [9] Li Y, Oldenburg D W. 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 1998, 63:109~119
- [10] Fedi M, Rapolla A. 3-D inversion of gravity and magnetic data with depth resolution. *Geophysics*, 1999, 64:452~460
- [11] Portniaguine O, Zhdanov M S. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, 1999, 64:874~887
- [12] Vasco D W, Taylor C. Inversion of airborne gravity gradient data, southwestern Oklahoma. *Geophysics*, 1991, 56:90~101
- [13] Condi F, Talwani M. Resolution and efficient inversion of gravity gradiometry. Soc. Explor. Geophys. Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstracts, 1999. 358~361
- [14] Zhdanov M S, Ellisiz R, Mukherjee S. Three-dimensional regularized focusing inversion of gravity gradient tensor component data. *Geophysics*, 2004, 69:925~937
- [15] Davis M A, O'Brien J. K-2 salt structure as determined by gravity gradiometry. Soc. Explor. Geophys. Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstracts, 2005. 472~475
- [16] Lee J, Li Y, Lane R. Effects of data filtering on inversion of gravity gradient data. Soc. Explor. Geophys. Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstracts, 2005. 627~630
- [17] Vasilevsky A, Droujinine A, Evans R Regularized inversion of 3D full tensor gradient (FTG) data for dynamic reservoir monitoring. Soc. Explor. Geophys. Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstracts, 2005. 700~703
- [18] Wan L, Zhdanov M S. Focusing inversion of marine full-tensor gradiometry data in offshore geophysical exploration. Soc. Explor. Geophys. Ann. Internat. Mtg., Expanded Abstracts, 2008. 751~754
- [19] Li Y, Oldenburg D W. Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method. *Geophys. J. Int.*, 2003, 152:251~265
- [20] Portniaguine O, Zhdanov M S. 3-D magnetic inversion with

- data compression and image focusing. *Geophysics*, 2002, **67**: 1532~1541
- [21] Silva J B C, Barbosa V C F. Interactive gravity inversion. *Geophysics*, 2006, **71**:J1~J9
- [22] 姚长利, 郝天珧, 管志宁等. 重磁遗传算法三维反演中高速计算及有效存储方法技术. 地球物理学报, 2003, **46**(2):252~258
Yao C L, Hao T Y, Guan Z N, et al. High speed computation and effective storage in 3-D gravity and magnetic inversion based on genetic algorithms. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(2):252~258
- [23] 姚长利, 郑元满, 张聿文. 重磁异常三维物性反演随机子域法方法技术. 地球物理学报, 2007, **50**(5):1576~1583
Yao C L, Zheng Y M, Zhang Y W. 3-D gravity and magnetic inversion for physical properties using stochastic subspaces. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(5):1576~1583
- [24] Patella D. Introduction to ground surface self-potential tomography. *Geophysical Prospecting*, 1997, **45**:653~681
- [25] Mauriello P, Patella D. Principles of probability tomography for natural-source electromagnetic induction fields. *Geophysics*, 1999, **64**:1404~1417
- [26] Mauriello P, Patella D. Localization of maximum-depth gravity anomaly sources by a distribution of equivalent point masses. *Geophysics*, 2001, **66**:1431~1437
- [27] Iuliano T, Mauriello P, Patella D. Looking inside Mount Vesuvius by potential fields integrated probability tomographies. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, **113**:363~378
- [28] 许令周, 关继腾, 房文静. 高次导数的概率成像原理. 青岛大学学报, 2003, **16**(4):32~36
Xu L Z, Guan J T, Fang W J. Theory of probability tomography about second derivative formula. *Journal of Qingdao University* (in Chinese), 2003, **16**(4):32~36
- [29] 王绪本, 毛立峰, 高永才. 电磁导数场概率成像方法研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 2004, **31**(6):679~684
Wang X, Mao L, Gao Y. Probability tomography of electromagnetic field-derivative method. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2004, **31**(6):679~684
- [30] 毛立峰, 王绪本, 高永才. 大地电磁概率成像的效果评价. 地球物理学报, 2005, **48**(2):429~433
Mao L F, Wang X B, Gao Y C. Appraisal on the MT probability tomography. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(2):429~433
- [31] Abdelrahman E M, Bayoumi A I, Abdelhady Y E, et al. Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies. *Geophysics*, 1989, **54**:1614~1621
- [32] 阮帅, 王绪本, 高永才等. 位场正则化下延在自然电位概率成像中的应用. 物探化探计算技术, 2006, **28**(4):332~336
Ruan S, Wang X B, Gao Y C, et al. Application of potential field normalized downward extrapolation in SP probability tomography. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 2006, **28**(4):332~336
- [33] 王绪本, 高永才. 基于正则化向下延拓的重磁概率成像方法研究. 见: 重磁数据处理解释应用研讨会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 2008. 49~54
Wang X, Gao Y. Probability tomography of gravity and magnetic anomalies based on regularized downward continuation. In: *Collection of Papers on the Workshop on Gravity and Magnetic Interpretation and Applications* (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008. 49~54
- [34] 徐世浙, 曹洛华, 姚敬金. 重力异常三维反演——视密度成像方法技术的应用. 物探与化探, 2007, **31**(1):25~28
Xu S Z, Cao L H, Yao J J. 3D inversion of gravity anomaly: an application of apparent density imagery technique. *Geophysical & Geochemical Exploration* (in Chinese), 2007, **31**(1):25~28

(本文编辑 汪海英)