

# 重力梯度张量数据的三维反演方法与应用

王浩然\* 陈超 杜劲松

(中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074)

王浩然,陈超,杜劲松. 重力梯度张量数据的三维反演方法与应用. 石油地球物理勘探,2013,48(3):474~481

**摘要** 全张量重力梯度测量技术日趋成熟,已成为地球物理勘探的重要方法之一。本文将重力异常三维反演技术应用于重力梯度张量数据反演,并针对重力梯度张量数据,构建了联合反演目标函数,同时引入投影梯度算法对反演求解过程施加约束。通过理论模型试验和实际资料的应用,表明了方法的可行性和应用前景。

**关键词** 重力梯度 三维反演 数据拟合差 模型目标函数

**中图分类号**:P631 **文献标识码**:A

## 1 引言

重力梯度数据比一般重力数据在反映异常体细节方面具有更高的分辨力,且重力梯度张量具有多个参量,包含了更加丰富的异常数据信息<sup>[1]</sup>。利用重力梯度张量数据进行反演,有利于更细致地刻画场源的空间构造形态、位置<sup>[2]</sup>。如今重力梯度测量技术可以进行所谓“全张量”的测量。

近些年来,三维反演技术在位场数据处理相关领域的研究得到了长足发展,Li等<sup>[3,4]</sup>给出了基于深度加权的重磁三维反演方法,Portniaguine等<sup>[5,6]</sup>提出了聚焦反演方法并将其用于磁化率成像。随着重力梯度测量技术的进步以及广泛应用,这些反演技术也成功地用于重力梯度数据的处理,Routh等<sup>[7]</sup>利用重力梯度张量数据进行盐丘的密度成像,Li<sup>[8]</sup>给出了重力梯度数据的三维反演方法,Zhdanov等<sup>[9]</sup>将聚焦反演方法应用于重力梯度数据,Zhdanov等<sup>[10]</sup>还引入了位场偏移方法进行重力梯度数据的快速反演。在实际资料的应用中,这些方法均取得了较好的成果<sup>[11~15]</sup>。

本文在Li等<sup>[3,4]</sup>研究工作的基础上,将重力异常三维反演方法应用于重力梯度数据的反演,通过对模型目标函数施加约束,引入约束优化方法中的

投影梯度算法求解反演目标函数的最优解,从而得到重力梯度数据的反演结果。

## 2 重力梯度反演的基本原理

### 2.1 重力梯度张量与正演

对于地下任意形状的地质体,已知其密度分布,在笛卡尔坐标系下便可得到重力场三分量沿3个坐标轴方向的梯度,即重力梯度张量

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} & T_{xz} \\ T_{yx} & T_{yy} & T_{yz} \\ T_{zx} & T_{zy} & T_{zz} \end{pmatrix} \quad (1)$$

应用重力梯度的不同分量构成重力梯度张量,并根据二阶偏导数求导的对称性,以及引力位满足拉普拉斯方程的特性,上述式(1)中的重力梯度张量 $\mathbf{T}$ 只有5个独立分量。

若将反演的地下目标空间划分为大小相等、紧密排列的直立长方体网格单元,而且每个直立长方体单元的密度均匀。那么地表重力梯度张量各分量与地下密度分布 $m$ 可以表示为如下线性关系

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}m \quad (2)$$

其中: $\mathbf{d}$ 表示地表的重力梯度值; $\mathbf{G}$ 表示模型空间密度分布的重力梯度正演核函数<sup>[16]</sup>。

\* 湖北省武汉市鲁磨路388号中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,430074。Email:whrzebra@163.com

本文于2012年1月5日收到,最终修改稿于2013年3月31日收到。

本研究受科技部国际科技合作专项(2010DFA24580)、国家自然科学基金(40730317,40774060)和中国地质大学(武汉)教学实验室开放基金(SKJ2011090)联合资助。

## 2.2 反演目标函数

重力梯度反演是依据观测数据获得地下空间的密度结构,反演结果所产生的重力梯度场应能够拟合观测数据。对于重力梯度单个分量,可利用  $L_2$  范数构建数据拟合差函数

$$\Phi_d = \| \mathbf{W}_d (\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{Gm}) \|^2 \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{d}^{\text{obs}}$  为观测数据的列向量;  $\mathbf{W}_d = \text{diag} \{1/\varepsilon_1, \dots, 1/\varepsilon_N\}$ ,  $\varepsilon_i$  为第  $i$  个观测数据的标准差。

由于重力梯度反演是一个欠定问题,为了得到稳定的可行解,在反演过程中需要对反演的模型进行约束,即构建模型目标函数,以压制反演的多解性。构建模型约束的准则可定义为接近参考模型的同时,在笛卡尔坐标系下沿 3 个坐标轴方向的变化较小,即模型较平滑,由此可定义模型目标函数为

$$\begin{aligned} \Phi_m(\mathbf{m}) = & \alpha_s \int_s \omega_s \omega(z)^2 (m - m_{\text{ref}})^2 dx dy dz + \\ & \alpha_x \int_s \omega_x \left[ \frac{\partial \omega(z)(m - m_{\text{ref}})}{\partial x} \right]^2 dx dy dz + \\ & \alpha_y \int_s \omega_y \left[ \frac{\partial \omega(z)(m - m_{\text{ref}})}{\partial y} \right]^2 dx dy dz + \\ & \alpha_z \int_s \omega_z \left[ \frac{\partial \omega(z)(m - m_{\text{ref}})}{\partial z} \right]^2 dx dy dz \quad (4) \end{aligned}$$

其中:  $\alpha_s, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  分别代表了模型目标函数中各项的相对权重;  $m_{\text{ref}}$  是参考模型,为反演前所获得的先验信息,在没有先验信息的情况下,参考模型可设为零;  $\omega_s$  为控制反演结果接近参考模型的权函数;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  为控制模型在  $x, y, z$  三个方向变化梯度大小的权函数。

在模型目标函数中,  $\omega(z)$  为深度加权函数。在位场反演中,核函数的衰减性质会导致反演结果的模型参数分布全部集中于地表,为了克服这种效应, Li 等<sup>[3]</sup> 在三维磁化率成像中引入深度加权函数。仅考虑深度方向的情况下,深度加权函数可以表示为

$$\omega(z) = \frac{1}{(z + z_0)^{\beta/2}} \quad (5)$$

其中:  $z$  为块体单元中心点埋深;  $z_0$  和  $\beta$  为常数,  $z_0$  为观测面的高度,重力梯度反演中选取的  $\beta$  值约等于 3。

将模型目标函数式(4)离散化,根据 Tikhonov 正则化理论,将最终的反演目标函数定义为数据拟合差函数与模型目标函数的组合,即

$$\begin{aligned} \Phi(m) = & \Phi_d + \mu \Phi_m \\ = & \| \mathbf{W}_d (\mathbf{d}^{\text{obs}} - \mathbf{Gm}) \|^2 + \mu \| \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}}) \|^2 \quad (6) \end{aligned}$$

其中  $\mu$  为正则化参数。通过  $L$  曲线<sup>[17]</sup> 搜索合适的正则化参数,使得模型复杂度和观测数据拟合差达到一个最小化的平衡点。

以上为重力梯度张量数据单分量的反演目标函数,为了充分利用重力梯度张量的多分量数据进行反演,可以对数据拟合差部分进行修改,将多分量数据拟合添加至数据拟合差部分。结合模型目标函数式,对于重力梯度张量多分量联合,针对不同的分量组合,总反演目标函数可写为

$$\Phi = \sum_{\alpha, \beta} \gamma_{\alpha\beta} \| \mathbf{W}_d^{\alpha\beta} (\mathbf{d}_{\alpha\beta}^{\text{obs}} - \mathbf{G}_{\alpha\beta} \mathbf{m}) \|^2 + \mu \| \mathbf{W}_m (\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}}) \|^2 \quad \alpha, \beta = x, y, z \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{d}_{\alpha\beta}^{\text{obs}}$  为重力梯度不同分量的观测数据;  $\gamma_{\alpha\beta}$  为对应数据拟合差项的权重系数。

构建完成反演目标函数之后,反演问题归结为求取反演目标函数极小值的模型参数的最优化问题。对于重力梯度反演,可以利用相应的最优化方法得到地下空间的密度分布。

## 2.3 物性约束反演

重力梯度张量反演的目标是获得真实合理的地下三维密度分布。如果单纯拟合观测数据及参考模型,可能最终得到的反演结果与实际情况不符,因此需要利用先验信息对反演结果进行约束。重力梯度反演目标函数中的参考模型可以作为一种等式约束,使得反演结果趋近于参考模型。对物性参数进行范围约束,可以将反演问题转化为最优化理论中的边界约束最优化问题,即

$$\min : \Phi(m) \quad m_1 \leq m \leq m_u \quad (8)$$

其中  $m_1$  和  $m_u$  分别为约束条件的下边界和上边界。传统的约束优化方法是通过对目标函数添加约束项,使约束优化问题转化为无约束优化问题进行求解。由于该方法对目标函数做出修改会对反演结果造成影响,因此本文选择在约束范围内搜索目标函数最优解的投影梯度方法<sup>[18]</sup>,而不对反演目标函数进行修改。

## 3 理论模型试验

为了验证反演算法的可靠性,可以设计理论模

型进行重力梯度的反演试算。理论模型试验的具体过程为:首先设计理论模型,再根据理论模型进行重力梯度正演计算,利用正演结果依据反演方法进行反演计算,将得到的结果与理论模型比较,以验证反演结果的正确性。本模型试验分别进行重力梯度单分量反演与多分量联合反演。

### 3.1 四方棱柱体模型

首先设计一个简单的四方棱柱体模型进行单分量反演试验,由于  $T_{zz}$  分量可以直观地反映地下密度分布,因此选择  $T_{zz}$  分量作为模拟观测数据。设置地下模型空间尺寸为  $2000\text{m} \times 2000\text{m} \times 1000\text{m}$ ,将地下模型空间划分为  $20 \times 20 \times 10$  个紧密排列的直立长方体单元网格,每个单元均为  $100\text{m} \times 100\text{m} \times 100\text{m}$  的立方体,设计的四方棱柱体模型由模型空间顶部延伸至模型空间底部,其几何中心水平位置位于模型空间水平位置的中心,棱柱体水平截面的边长为  $600\text{m}$ ,设计密度为  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ,如图 1 所示。计算该理论模型在地表产生的重力梯度张量的  $T_{zz}$  分量,结果如图 2 所示,其中重力梯度的单位为“厄缶”,简写为 E( $1\text{E} = 1 \times 10^{-9}\text{s}^{-2}$ )。

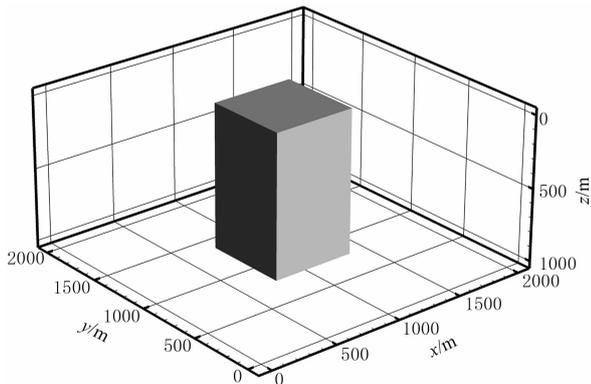


图 1 四方棱柱体理论模型

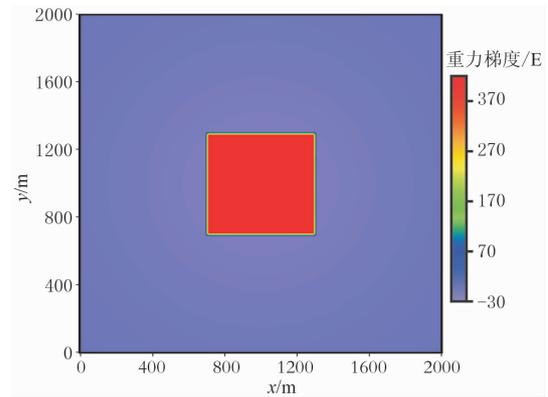


图 2 理论模型重力梯度张量  $T_{zz}$  分量正演结果

利用重力梯度三维反演方法,依据理论模型在地表产生的重力梯度分布进行反演计算。首先利用模型空间网格的核矩阵与正演得到的模拟观测数据构建数据拟合差,然后构建模型目标函数,假定没有任何先验信息,即参考模型向量为零向量。反演试验中模型目标函数式(4)各权重参数分别取  $\alpha_s = 0.000025$ 、 $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = 1.0$ ,由于假设地下分布无任何先验信息,权函数  $\omega_s$ 、 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$  均取值为  $1.0$ ,深度加权函数中  $z_0 = 1.0$ 、 $\beta = 3.0$ 。构建完成反演目标函数后设计反演大小约束范围为  $0.0 \sim 1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ,利用投影梯度算法最小化反演目标函数搜索模型参数,得到最终的反演结果。

图 3 为  $T_{zz}$  单分量反演分别沿水平方向与垂直方向的密度分布切片。通过反演结果与理论模型对比可知, $T_{zz}$  单分量约束反演结果与理论模型对应较好,深度  $300\text{m}$  处水平切片反演结果与理论模型完全一致,垂直切片反演结果在深部与理论模型稍有偏差。该反演结果一方面反映了重力梯度数据水平分辨率高的特点,另一方面也表明了该约束反演方法的有效性。

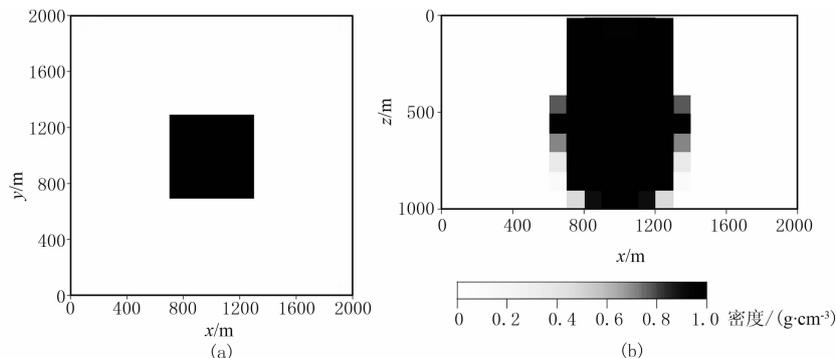


图 3  $T_{zz}$  单分量反演结果切片

(a) 深度  $300\text{m}$  处水平切片; (b)  $y$  方向  $1000\text{m}$  处垂直切片

### 3.2 直立长方体模型

设计一个简单的直立长方体模型分别对  $T_{zz}$  分量约束反演与多分量联合约束反演进行理论模型试验对比。由于  $T_{xz}$  与  $T_{yz}$  分量可以反映地下密度异常体的边界信息,因此选择  $T_{xz}$ 、 $T_{yz}$  与  $T_{zz}$  作为三分量组合进行联合反演。设置地下模型空间大小及直立长方体网格划分方式与 3.1 相同,设计的直立长方体模型中心埋深为 350m,其几何中心水平位置位于模型空间水平位置的中心,直立长方体模型的模型尺寸为  $800\text{m} \times 400\text{m} \times 300\text{m}$ ,设计密度为  $1\text{g}/\text{cm}^3$ ,如图 4 所示。分别计算该理论模型在地表产生的重力梯度张量的  $T_{xz}$ 、 $T_{yz}$  与  $T_{zz}$  分量,如图 5 所示。

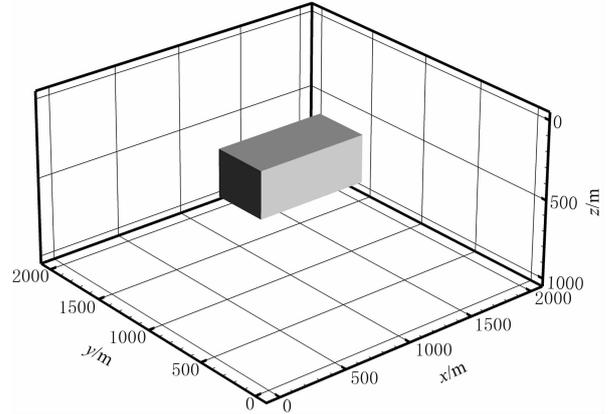


图 4 直立长方体理论模型

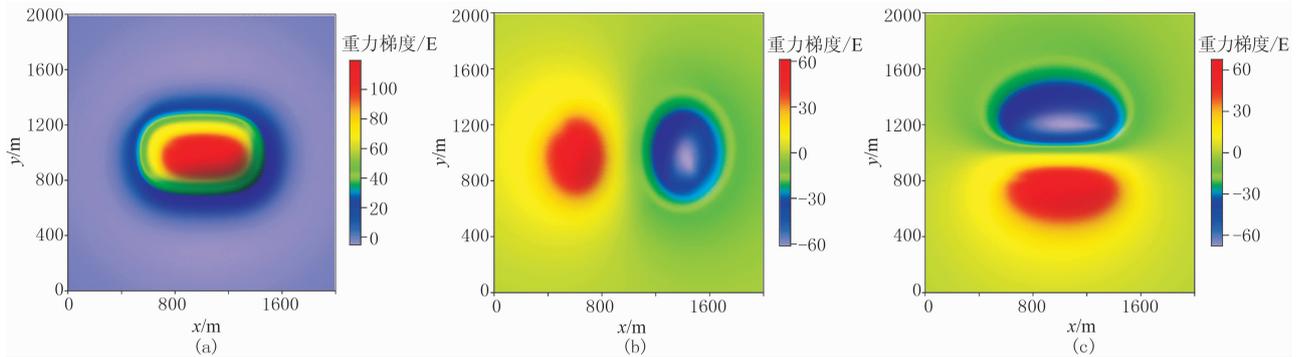


图 5 理论模型重力梯度张量三分量的正演结果  
(a)  $T_{zz}$  分量; (b)  $T_{xz}$  分量; (c)  $T_{yz}$  分量

同样,利用重力梯度三维约束反演方法,依据理论模型在地表产生的重力梯度分布进行单分量以及多分量联合反演计算。在  $T_{zz}$  单分量反演与  $T_{xz}$ 、 $T_{yz}$ 、 $T_{zz}$  多分量联合反演试验中,模型目标函数式(4)的各权重参数取值与 3.1 相同。在三分量联合反演中,数据拟合差部分赋予三个分量相同的权重,即  $\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \gamma_{zz} = 1.0$ ,设计反演约束范围为  $0.0 \sim 1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ,求解反演目标函数。

图 6 为  $T_{zz}$  单分量反演与  $T_{xz}$ 、 $T_{yz}$ 、 $T_{zz}$  多分量联合反演沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴方向的密度分布切片对比,黑色线框为理论模型轮廓。通过反演结果与理论模型对比表明,单分量反演与多分量联合反演得到的密度分布与理论模型对应较好;通过反演结果对比可以看出,多分量联合反演结果更为聚焦,由于其加入了可以反映边界信息的  $T_{xz}$  与  $T_{yz}$  分量,比单分量反演的上边界信息更清晰。

### 3.3 倾斜板状体组合模型

下面设计一个较为复杂的倾斜板状体组合模型,如图 7 所示。利用重力梯度张量全部 6 个不同

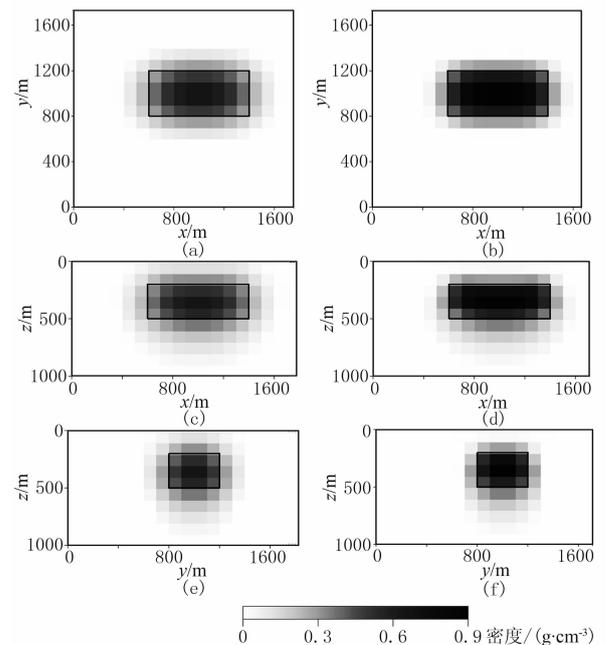


图 6  $T_{zz}$  单分量反演(左)与三分量联合反演(右)的密度分布切片对比  
(a)、(b)深度 300m 处水平切片; (c)、(d)y 方向 1000m 处垂直切片; (e)、(f)x 方向 1000m 处垂直切片

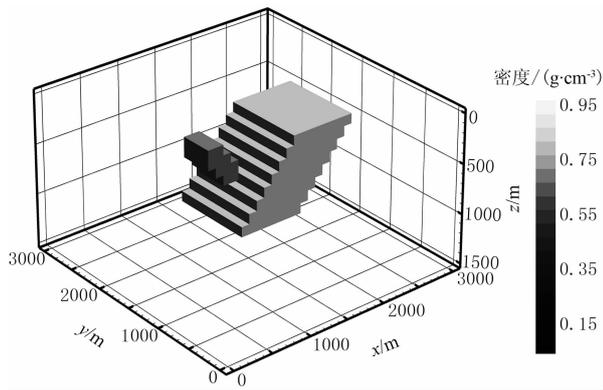


图7 倾斜板状体组合理论模型

分量,即全张量重力梯度进行重力梯度多分量联合反演试验。设置地下模型空间尺寸为 3000m × 3000m × 1500m,将地下模型空间划分为 30 × 30 × 15

的总计 13500 个紧密排列的直立长方体单元网格,每个单元的尺寸均为 100m × 100m × 100m 的立方体。计算该理论模型在地表的全张量重力梯度结果如图 8 所示。

依据理论模型在地表计算得到的全张量重力梯度进行反演计算。反演目标函数中模型目标函数式(4)各参量与约束反演范围取值与 3.1 相同,联合反演数据拟合差各分量权重系数均设为 1.0。图 9 为反演得到的密度分布分别沿水平与垂直方向的切片,黑色线框为理论模型位置。由于位场的叠加性,在两个板状体模型垂直方向重叠处反演结果出现偏差,但总体上反演结果边界与模型块体边界可以对应,且反演结果上边界与理论模型基本一致。

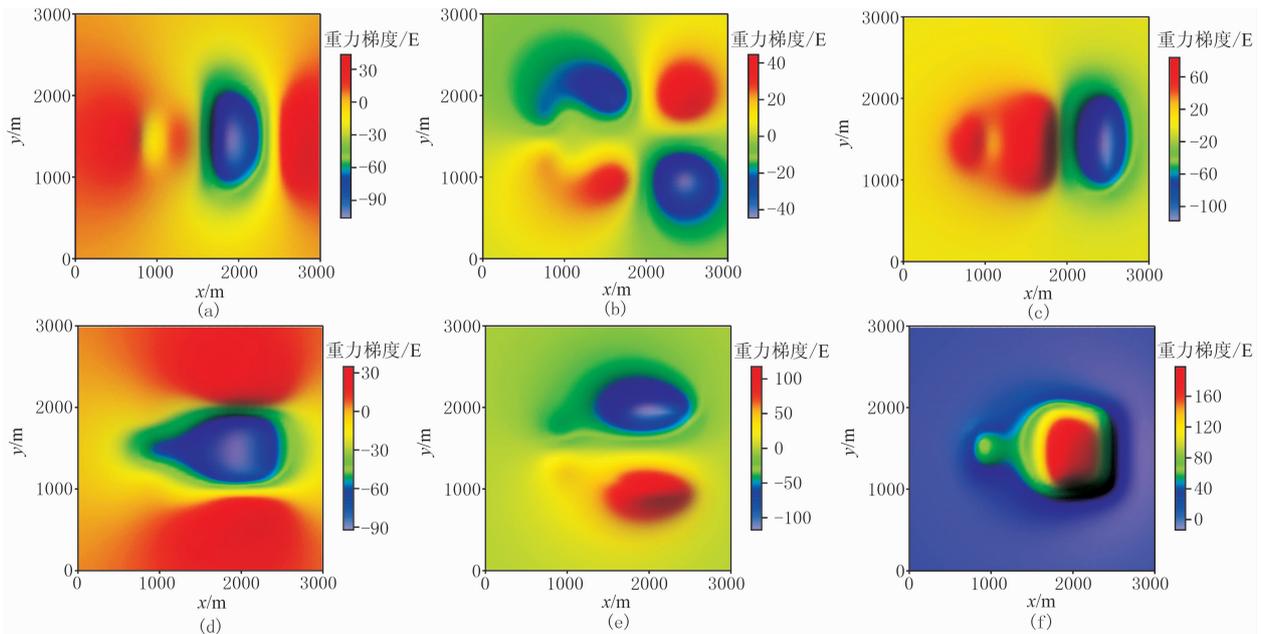


图8 理论模型全张量重力梯度的正演结果

(a)  $T_{xx}$ 分量; (b)  $T_{xy}$ 分量; (c)  $T_{xz}$ 分量; (d)  $T_{yy}$ 分量; (e)  $T_{yz}$ 分量; (f)  $T_{zz}$ 分量

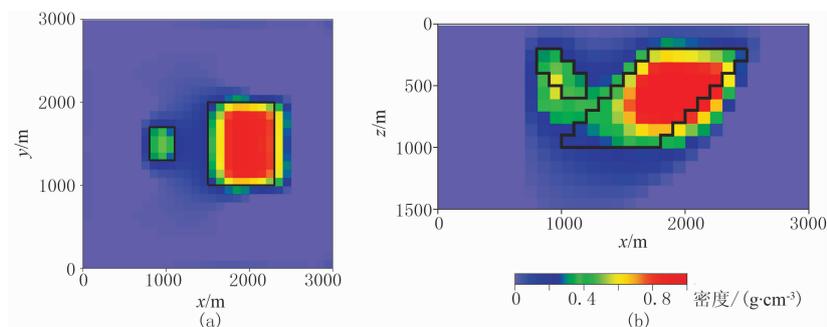


图9 全张量重力梯度反演结果切片

(a)深度 400m 处水平切片; (b)y 方向 1500m 处垂直切片

### 4 实测数据应用

将上述反演方法应用于实测重力梯度数据的反演处理。研究区为美国路易斯安那州的 Vinton 盐丘区,该区位于路易斯安那州的西南与德克萨斯州交界处,其南毗邻墨西哥湾,如图 10 五角星位置所示。区内为沉积岩相,地下发育盐丘构造。墨西哥湾盐丘区附近拥有丰富的油气储量,石油和天然气的沉积及储层都与盐丘有关,因此对盐丘地区的研究意义重大<sup>[19~22]</sup>。

文中所使用数据为航空重力梯度张量数据,测区范围为北纬 30.07°~30.23°、西经 93.53°~93.66°,总测线长度为 1087.5km,测区面积为 192.6km<sup>2</sup>。重力梯度反演选择图中 4000m×4000m 明显重力梯度异常高值区域,数据类型选用可以直接反映异常体密度分布情况的  $T_{zz}$  分量。该数据为地形改正后数据,地形改正密度值为 1.8g/cm<sup>3</sup>,并将数据网格化,如图 11 所示。将反演目标区域的地下空间划分为 40×40×30 个紧密排列直立长方体单元,每个单元尺寸为 100m×100m×50m,反演深度为 1500m,使用重力梯度约束反演方法进行反演计算,

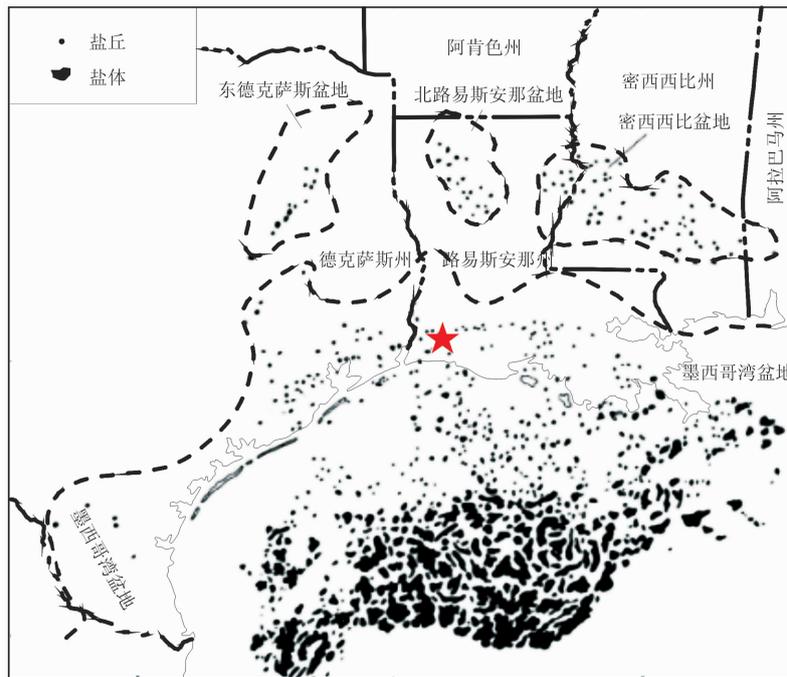


图 10 墨西哥湾盐丘分布(据 Kyle 等<sup>[23]</sup>)

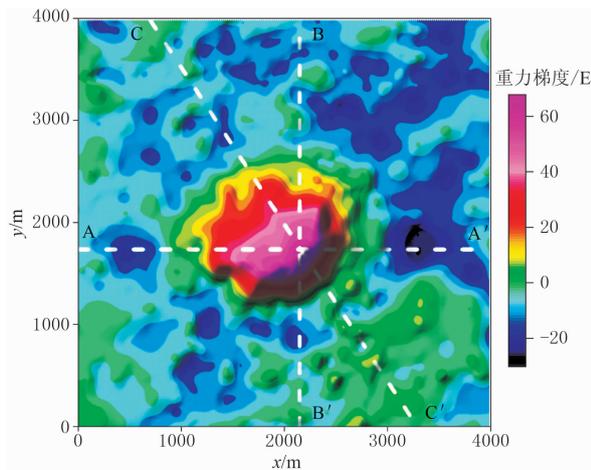


图 11 实测  $T_{zz}$  分量数据等值线图

最终得到反演的剩余密度分布结果。截取图 11 中所示的 AA'、BB'、CC' 三个垂直切片,计算的剩余密度分布如图 12 所示。

从 Vinton 盐丘区的密度成像结果看,高密度值的分布约在 200~600m 的深度。推断盐丘是由于盐层与上覆沉积层存在密度差异,引起向上冲顶沉积岩层而形成的构造,由埋藏在沉积岩层中垂直柱状盐体构成。在盐柱的顶部覆盖有不透水的坚硬的覆盖层,主要成分为石膏、硬石膏以及方解石,由盐体暴露于地表溶解而形成<sup>[23]</sup>,从物质构成分析其密度要高于周围相对松软的沉积岩层以及覆盖的盐体。而近地表沉积岩由于受到压力较小,孔隙度大,密度也小于盐体,因此高密度体部分可推测为盐丘

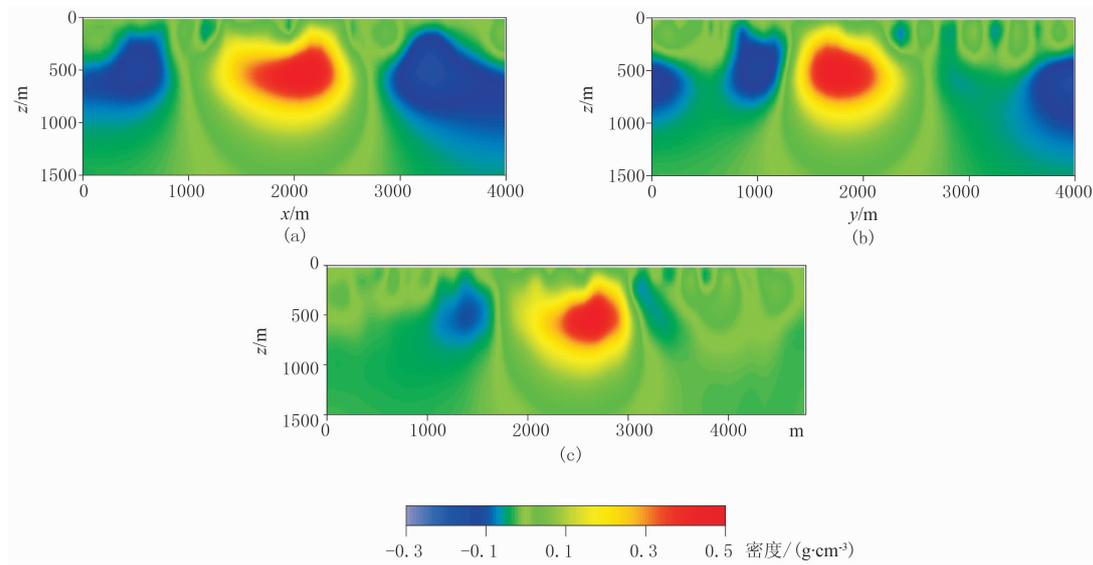


图 12 实测数据反演的剩余密度分布切片图  
(a)AA'处垂直切片; (b)BB'处垂直切片; (c)CC'处垂直切片

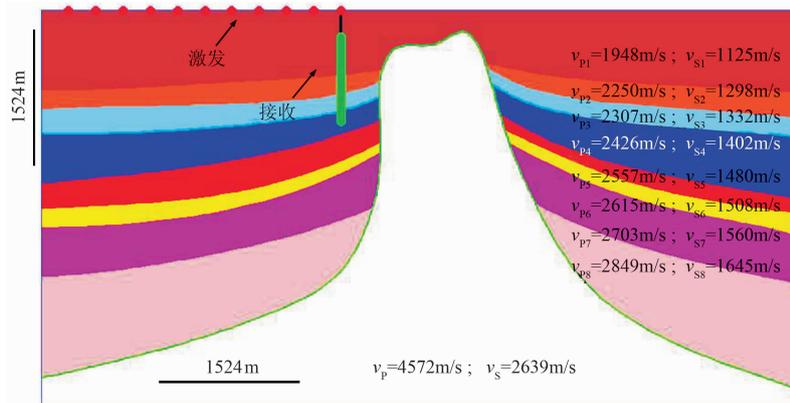


图 13 Vinton 盐丘模型(据 Jovanovi<sup>[24]</sup>)

的岩帽以及顶部。图 13 为 Jovanovi<sup>[24]</sup> 在 Vinton 盐丘区用超声测井速度成像构造的盐丘模型剖面,剖面位置与图 12c 相对应,通过对比可以看到高密度体分布与盐丘模型顶部的深度以及形状都对应较好,进一步验证了反演结果的正确性。在盐丘构造的发育演化过程中,盐体向上冲顶挤压沉积岩层,形成的异常高压导致裂缝发育<sup>[25]</sup>,因此在高密度体周围的密度分布不均匀,推测与盐丘周围普遍存在的断裂构造有关。

## 5 结论

本文基于 Tikhonov 正则化理论,通过数据拟合差函数与模型目标函数构建重力梯度张量单分量

反演目标函数,采用 L 曲线方法寻找最佳正则化参数,使得反演结果既能满足数据拟合差,又能压制反演的多解性。通过重力梯度张量多分量的各个分量数据拟合差函数组合,实现对重力梯度张量多分量数据的联合反演,数据信息含量的增加,使得反演结果更加可靠。对于反演目标函数的求解,本文引入投影梯度约束最优化方法进行约束反演计算,利用约束信息可得到更接近实际地质情况的三维密度分布。

理论模型试验结果表明,三维重力梯度反演方法对重力梯度张量数据反演处理的计算精度可靠,可以较好地确定地下密度异常体的分布;利用多分量联合反演可以综合重力梯度张量多分量数据的信息,有效减少反演结果多解性,使反演的密度值较单

分量反演更加聚焦而准确;另外理论模型试验的反演结果还表明重力梯度数据具有水平分辨率高的特点,反演结果水平切片与理论模型比对符合程度较高。

通过美国 Vinton 盐丘地区实测计算,不仅验证了该方法在实际应用方面的有效性,而且为该地区的研究工作提供了依据。

本项研究中所使用的实测数据是由 Bell Geospace 公司提供,同时本项研究得到了梁青、张毅、刘圣博等的帮助,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [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 Hualin. Present state and revival of gravity gradiometry. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 23(1): 1~6
- [2] 朱自强, 曾思红, 鲁光银. 重力张量数据的目标体边缘检测方法探讨. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 482~488  
Zhu Ziqiang, Zeng Sihong and Lu Guangyin. Discussion on the edge detection technique for gravity gradient tensor data. *OGP*, 2011, 46(3): 482~488
- [3] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of magnetic data. *Geophysics*, 1996, 61(2): 394~408
- [4] Li Y G, Oldenburg D W. 3-D inversion of gravity data. *Geophysics*, 1998, 63(1): 109~119
- [5] Portniaguine O, Zhdanov M S. Focusing geophysical inversion images. *Geophysics*, 1999, 64(3): 874~887
- [6] Portniaguine O, Zhdanov M S. 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing. *Geophysics*, 2002, 67(5): 1532~1541
- [7] Routh P et al. Base of the salt imaging using gravity and tensor gravity data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 20: 1482~1484
- [8] Li Y G. 3-D inversion of gravity gradiometer data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2001, 20: 1470~1473
- [9] Zhdanov M S et al. Three-dimensional regularized focusing inversion of gravity gradient tensor component data. *Geophysics*, 2004, 69(4): 925~937
- [10] Zhdanov M S et al. Rapid imaging of gravity gradiometry data using 2D potential field migration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 29: 1132~1136
- [11] Droujinine A, Evans R. Regularized inversion of 3 D full tensor gradient (FTG) data for dynamic reservoir monitoring. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2005, 24: 700~703
- [12] Wan L, Zhdanov M S. Focusing inversion of marine full-tensor gradiometry data in offshore geophysical exploration. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2008, 27: 751~755
- [13] Martinez C et al. 3-D inversion of airborne gravity gradiometry for iron ore exploration in Brazil. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2010, 29: 1753~1757
- [14] Zhdanov M S et al. 3D potential field migration for rapid imaging of gravity gradiometry data - A case study from Broken Hill, Australia, with comparison to 3D regularized inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30: 825~829
- [15] Martinez G, Li YG. Inversion of regional gravity gradient data over the Vredefort Impact Structure, South Africa. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30: 841~845
- [16] 郭志宏, 管志宁, 熊盛青. 长方体  $\Delta T$  场及其梯度场无解析奇点理论表达式. 地球物理学报, 2004, 47(6): 1131~1138  
Guo Zhihong, Guan Zhining and Xiong Shengqing. Cuboid  $\Delta T$  and its gradient forward theoretical expressions without analytic odd points. *Chinese J Geophys*, 2004, 47(6): 1131~1138
- [17] Tikhonov A N, Arsenin V Y. *Solution of Ill-posed Problems*. W H Winston & Sons, Inc, 1977
- [18] Birgin E G et al. Nonmonotone spectral projected gradient methods on convex sets. *SIAM Journal on Optimization*, 2000, 10(4): 1196~1211
- [19] Zhou H W. First-break vertical seismic profiling tomography for Vinton Salt Dome. *Geophysics*, 2006, 71(3): 29~36
- [20] Constance P E. Vinton salt dome, current issues in structural imaging. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2003, 22: 2357~2361
- [21] Duncan W S. Using seismic data to improve the geologic model of the Vinton dome area. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2003, 22: 2353~2356
- [22] Ennen C, Hall S. Structural mapping of the Vinton salt dome, Louisiana, using gravity gradiometry data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2011, 30: 830~835
- [23] Kyle J R, Posey H H. Halokinesis, cap rock development, and salt dome mineral resources// Melvin J L. *Evaporites, Petroleum and Mineral Resources. Developments in Sedimentology*, 1991, 50: 413~474
- [24] Jovanovic K. *P and SV Polarization Filtering of a Multicomponent Vector VSP*. Houston: University of Houston, 2004
- [25] 梁杰, 龚建明, 成海燕. 墨西哥湾盐岩分布对油气成藏的控制作用. 海洋地质动态, 2010, 26(1): 25~30  
Liang Jie, Gong Jianming and Cheng Haiyan. Control of salt rock distribution on oil and gas pooling in the Gulf of Mexico. *Marine Geology Letters*, 2010, 26(1): 25~30

(本文编辑:冯杏芝)