

doi: 10.11720/wtyht.2022.1116

冯旭亮,魏泽坤.基于界面反演增强的位场边缘识别方法[J].物探与化探,2022,46(1):130–140.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1116

Feng X L, Wei Z K. An edge recognition technique enhanced with interface inversion for potential field data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 130–140. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1116

基于界面反演增强的位场边缘识别方法

冯旭亮^{1,2}, 魏泽坤^{1,2}

(1. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065)

摘 要: 准确识别含油气构造及控矿断裂与岩体等地质边界是能源和资源勘查的重要任务之一, 重、磁位场边缘识别方法在研究地质边界方面有独特的优势, 已成为能源和资源勘查中不可或缺的重要手段。为增强位场边缘识别方法对深部小规模构造的识别能力, 本文将界面反演与归一化总水平导数垂向导数(NVDR_THDR)位场边缘识别技术结合起来, 首先利用密度界面反演技术处理重力异常, 使结果能突出小规模地质构造特征, 之后将 NVDR_THDR 作为边界提取和增强的技术处理反演的界面深度。裂陷盆地模型试验及孤立形体组合模型试验结果表明, 本文方法具有明显的边缘增强效果, 并且能在一定程度上平衡深部和浅部异常。最后将该方法用于鄂尔多斯盆地北部重力资料处理之中, 结果也表明了本文方法可以更好地识别盆地基底小规模断裂, 实际应用效果较好。

关键词: 边缘识别; 密度界面反演; 重力异常; 边界增强

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)01-0130-11

0 引言

油气资源、深部矿体等的形成与分布往往与断裂、火成岩体等有着直接或间接的关系, 因此利用地球物理方法探测断裂或岩体的位置在油气藏勘查和深部找矿中起着至关重要的作用^[1-4], 这些断裂或岩体的位置可统称为地质边界。重、磁方法在研究地质体横向不均匀性、特别是地质边界方面有独特的优势。利用重、磁位场资料识别地质体边界的方法可分为数理统计、数值计算和其他方法^[5], 其中数值计算类方法研究和使用的最多, 比较有代表性方法主要有垂向导数^[6-7]、总水平导数^[8-9]、解析信号振幅^[10-12]、倾斜角(Tilt 导数)^[13-15]、 θ 图^[16] 5 种基本方法, 以及在这 5 种基本方法上发展起来的其他方法, 如倾斜角总水平导数^[17]、改进 Tilt 梯度水平总梯度^[18] 等。

王万银等^[5] 概括了各类位场边缘识别方法的研究现状, 重点对数值计算类中垂向导数、总水平导

数、解析信号振幅、倾斜角、 θ 图这 5 种基本方法及其基础上发展的各方法原理和应用效果进行了研究。Ekinici 等^[19] 对以上 5 种常用的边缘识别方法进行了系统研究, 并处理了土耳其安纳托利亚半岛地区的实际资料, 与已知构造的对比结果证实了以上边缘识别方法的有效性。为进一步增强位场边缘识别方法的处理效果, 特别是对深部小构造的识别能力, 一种措施是对边缘识别方法处理结果进行滤波增强^[20-23]。不同基本方法的组合也是常用的提高边缘识别效果的措施, 如倾斜角解析信号模法^[24]、解析信号模倾斜角法^[25] 等。英高海等^[26] 对比了 15 种具有代表性的边界增强方法, 认为解析信号模垂向导数、总水平导数、解析信号模倾斜角法是针对磁异常适用性较强、应用效果较好的 3 种方法。

为提高弱异常(深部异常体)的边缘识别效果, 一些学者研究了均衡类方法。马国庆等^[27] 利用水平与垂直导数的相关系数进行位场边缘识别, 并基于不同阶水平导数构造了多个增强型的位场边缘识别方法^[28-29]。此外, 王彦国等^[30] 利用不同阶次的

收稿日期: 2021-03-05; 修回日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于不同范数的密度界面三维重力反演研究”(41904115)

第一作者: 冯旭亮(1989-), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事重、磁勘探方法理论与应用及构造地球物理解释研究工作。Email: fxlchd@

垂向导数的比值进行位场边缘检测, Du 等^[31] 则利用垂向导数的平均值与标准差的相关系数进行位场边缘检测, 于平等^[32] 将水平方向解析信号及其垂向导数与传统的均衡边界识别方法结合形成了位场边界探测方法。郭灿文等^[33] 利用水平导数与垂向导数的标准差的相关系数识别了磁源边界。Pham 等^[34] 利用总水平导数构建逻辑函数并据此识别位场边界, 可明显增强边界识别的效果。

归一化类方法也是增强深部场源弱异常识别能力的主要措施, 如归一化总水平导数法^[35-37]、归一化 θ 图法^[38]。Wang 等^[39] 提出了归一化总水平导数垂向导数 (NVDR_THDR) 边缘识别技术, 该技术不但具有边缘探测功能, 并且具有边缘增强功能, 在划分断裂^[40-42]、解释岩体边界^[43] 等方面取得了较好的应用效果。我们曾在识别裂陷盆地基底不同区域界面形态时, 尝试将直接迭代密度界面反演方法^[44-45] 加入到 NVDR_THDR 位场边缘识别技术之中, 提高了基底深部小规模断裂的识别能力^[46], 但并未对该方法的细节及应用效果进行详细研究。本文将详细阐述这一技术的原理, 并通过不同类型的模型试算及实际资料处理, 以分析该方法的正确性及应用效果。

1 方法原理

基于界面反演增强的位场边缘识别方法由界面反演技术和位场边缘识别技术组成。首先利用密度界面反演方法对重力异常进行处理 (若为磁异常, 可利用磁性界面反演方法进行, 或转换为磁源重力异常), 之后利用位场边缘识别技术对密度界面反演结果进行处理。其中密度界面反演技术采用直接迭代法计算, 计算公式为^[45,47]:

$$p^k(x_i, y_i) = p^{k-1}(x_i, y_i) + \frac{g^o(x_i, y_i) - g^{\text{cal}}(x_i, y_i)}{2\pi G \Delta\rho(x_i, y_i)},$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中 $p^k(x_i, y_i)$ 和 $p^{k-1}(x_i, y_i)$ 分别为第 i 个计算点处第 k 次和第 $k-1$ 次的反演结果; G 为万有引力常量; $\Delta\rho(x_i, y_i)$ 为第 i 个计算点处的密度差; $g^o(x_i, y_i)$ 和 $g^{\text{cal}}(x_i, y_i)$ 分别为第 i 个点处实测的重力异常和第 $k-1$ 次迭代时该点的正演拟合重力异常。计算拟合重力异常时将密度界面与参考界面之间的物质剖分为垂直并置的棱柱体, 重力计算点位于棱柱体正上方, 其个数与计算点数相同, 水平尺寸与计算点间距一致, 计算公式为:

$$g^{\text{cal}}(x_i, y_i) = \sum_{j=1}^N f_i(p_j), \quad (2)$$

式中非线性函数 $f_i(p_j)$ 用来计算第 j 个棱柱体在第 i 点处引起的重力异常, 其表达式为:

$$f_i(p_j) = G \int_{\xi_{j1}}^{\xi_{j2}} \int_{\eta_{j1}}^{\eta_{j2}} \int_{\zeta_{j1}}^{\zeta_{j2}} \Delta\rho(x_i, y_i) \cdot \frac{\zeta_j - z_i}{[(\xi_j - x_i)^2 + (\eta_j - y_i)^2 + (\zeta_j - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} d\xi_j d\eta_j d\zeta_j, \quad (3)$$

式中: $(d\xi_j, d\eta_j, d\zeta_j)$ 为剖分棱柱体内任一微元的坐标, $\xi_{j1} \sim \xi_{j2}$ 、 $\eta_{j1} \sim \eta_{j2}$ 、 $\zeta_{j1} \sim \zeta_{j2}$ 分别为第 j 个棱柱体在 3 个方向的坐标范围。

利用式 (1) 反演密度界面深度时, 通常令 p^0 为零开始迭代, 并利用 $g^o(x_i, y_i)$ 与 $g^{\text{cal}}(x_i, y_i)$ 的均方差小于重力数据的噪声水平而终止迭代计算。然而, 本文重点将其应用于深部场源体异常的增强, 并不要求反演结果有较高的准确性, 因此一般迭代 3~5 次即可。需要说明的是, 对于多个孤立地质体引起的异常, 从几何形态而言, 并非密度界面, 但其引起的异常也可利用该方法进行增强。

本文选用归一化总水平导数垂向导数 (NVDR_THDR) 技术作为位场边缘识别方法, 用该技术直接处理密度界面的反演结果。结合本文处理流程, 其方法原理^[39] 如下:

计算密度界面反演结果总水平导数 (THDR):

$$\text{THDR}(x, y, z) = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y}\right)^2}, \quad (4)$$

式中: $f(x, y, z)$ 为密度界面反演结果。

计算总水平导数的 n 阶垂向导数:

$$\text{VDR}_n(x, y, z) = \frac{\partial^n \text{THDR}(x, y, z)}{\partial z^n}, \quad (5)$$

式中: n 为垂向导数的阶次, 阶次越高, 计算结果的水平分辨率越高, 但计算结果不稳定, 阶次一般选 1 或 2 即可。

计算总水平导数的峰值:

$$\text{PTHDR}(x, y, z) = \begin{cases} 0, & \text{VDR}_n(x, y, z) < 0 \\ \text{VDR}_n(x, y, z), & \text{VDR}_n(x, y, z) \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

计算总水平导数峰值与总水平导数的比值:

$$\text{VDR_THDR}(x, y, z) = \begin{cases} 0, & \text{PTHDR}(x, y, z) = 0 \\ \frac{\text{PTHDR}(x, y, z)}{\text{THDR}(x, y, z)}, & \text{PTHDR}(x, y, z) > 0 \end{cases} \quad (7)$$

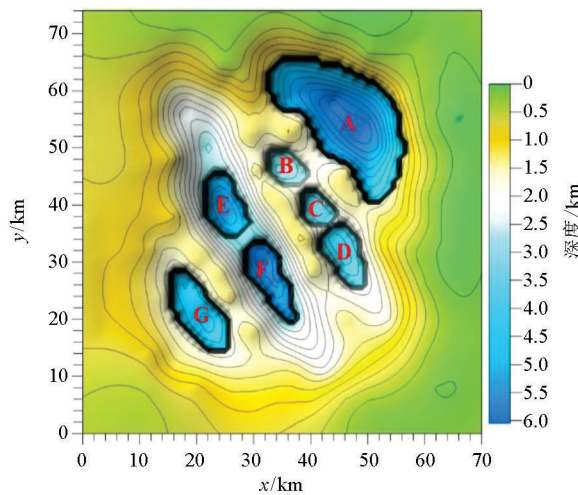
计算总水平导数垂向导数的极大值并利用其对总水平导数垂向导数归一化:

$$NVDR_THDR(x, y, z) = \frac{VDR_THDR(x, y, z)}{VDR_THDR_{\max}} \quad (8)$$

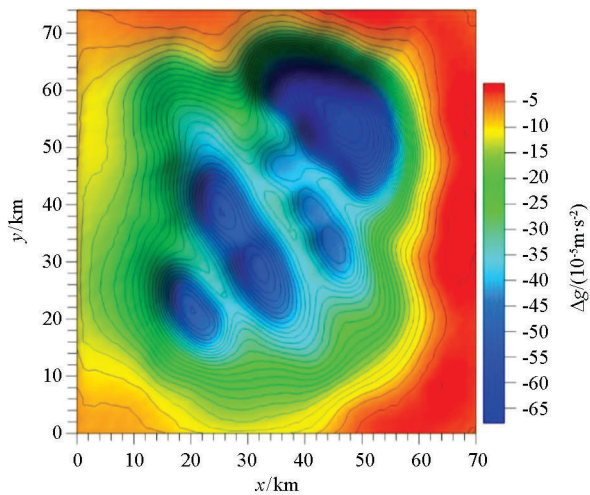
2 模型试算

2.1 裂陷盆地基底模型

裂陷盆地模型如图 1a 所示,该盆地由 7 个大小不一的次盆组成(编号为 A~G),基底最大深度为 6 km。假设沉积层与基底的密度差为 $-0.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,将盆地的沉积层剖分为水平尺寸为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 垂直并置的棱柱体计算其重力异常,并加入均值为 0、标准差为 $0.1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的高斯白噪声,作为盆地模型的实测重力异常,如图 1b 所示。理论重力异常基本能反映各次盆的位置及形态,但距离较近的几个次盆的边界(实质为断裂)无法区分。



(a) 裂陷盆地基底模型



(b) 裂陷盆地引起的理论重力异常

图 1 裂陷盆地模型及其重力异常

Fig.1 A rifted basin model and its gravity anomaly

实构造更为接近的“异常”从而提高边缘识别能力,因此若能找到一种与理论构造更为接近的处理结果或对重力异常局部增强结果并用 NVDR_THDR 进行边缘识别,是否也能得到理想的效果?图 2e~h 分别为采用位场分离、稳定向下延拓、倾斜角和解析信号振幅对重力异常处理并利用 NVDR_THDR 对异常进行提取的结果。其中,剩余重力异常的 NVDR_THDR 结果(图 2e)极大值幅值较窄,也能清晰地呈现次盆 B 的东部边界,但无法识别次盆 D、E 和 F 的南北边界。采用稳定向下延拓技术向下延拓 3 km 重力异常的 NVDR_THDR 结果(图 2f)与剩

利用本文方法对图 1b 所示的重力异常进行处理,其中在利用密度界面反演技术时,给定密度差为 $-0.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,迭代 5 次的结果如图 2a 所示。与原始重力异常(图 1b)相比,图 2a 的反演结果中可以明显区分 7 个次盆的位置及形态,边界较为清晰,利用 NVDR_THDR 对密度界面反演结果做进一步处理,结果如图 2b 所示,其极大值位置与理论模型中次盆的边界较为吻合,并且也能在一定程度上区分距离较近的几个次盆的范围,如次盆 B、C、D 以及次盆 E、F。利用 NVDR_THDR 方法直接对重力异常进行处理,结果如图 2c 所示。与图 2b 相比,图 2c 的结果中次盆 B 的右边界不完整,无法呈现 E 和 F 的南北边界及分界线。为提高小规模构造的识别能力,在 NVDR_THDR 技术中垂向导数的阶次选为 2 重新处理,结果如图 2d 所示,与垂向一阶导数结果(图 2c)相比,垂向导数阶次为 2 时计算结果幅值更窄,但其仍然无法有效识别上述次盆的边界。

本文方法的实质是将重力异常转换为一种与真

余异常结果较为相似,但其仍然无法反映 E 和 F 的南北边界。倾斜角的 NVDR_THDR 结果(图 2g)与垂向导数阶次为 2 的 NVDR_THDR 结果(图 2d)较为类似,但其幅值更宽一些。解析信号振幅的 NVDR_THDR 结果(图 2h)对于两个规模较大的次盆 A 和 G 识别较好,但对于规模较小且距离较近的次盆无法有效识别其边界。图 2 的结果表明,本文提出的方法更有利于盆地基底断裂的识别,尤其对于小规模断裂构造更为有效。

利用密度界面反演方法增强位场边缘识别效果时,界面上下的密度差是一个关键参数。图 2a 为密

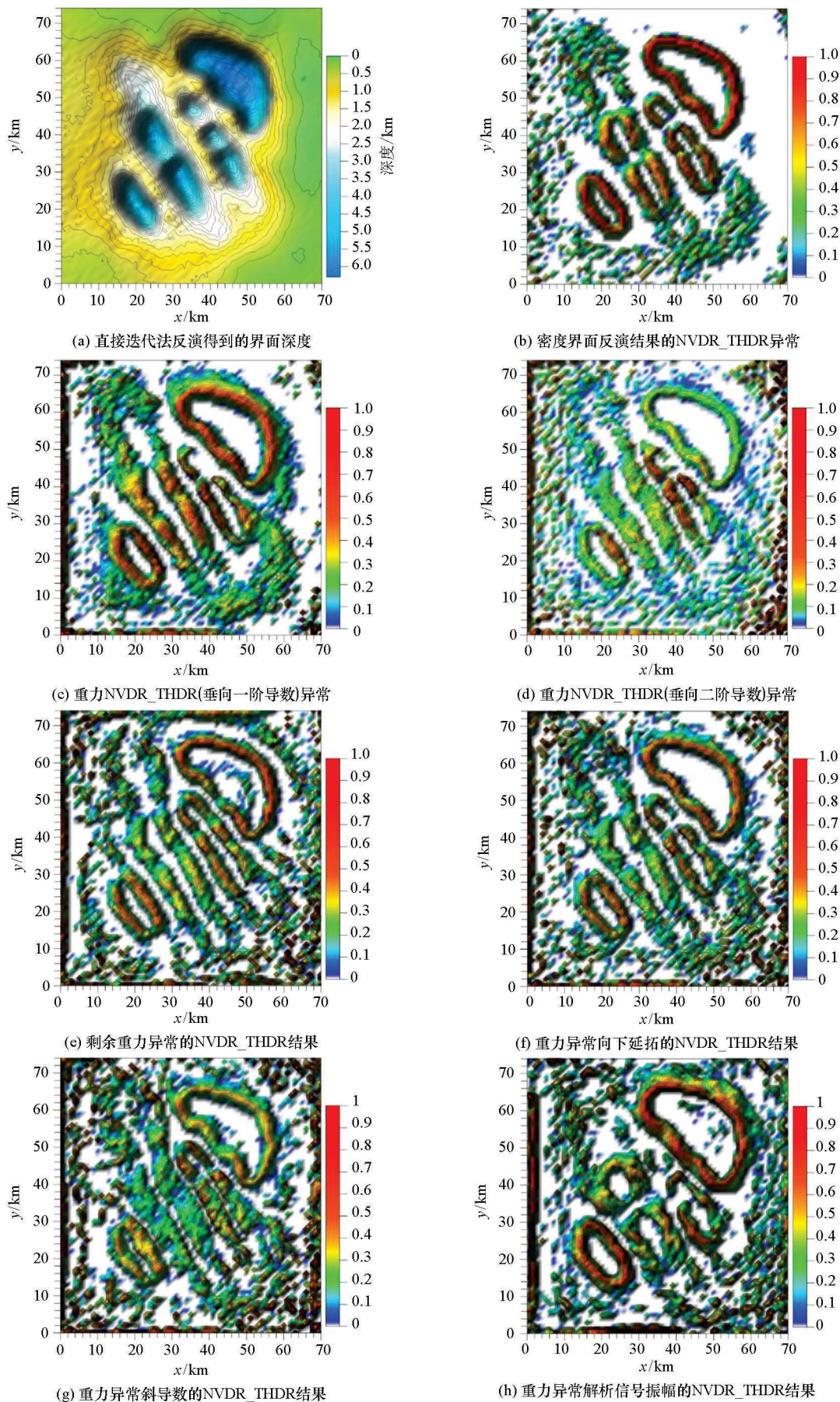


图 2 裂陷盆地模型位场边缘识别结果

Fig.2 The edge recognition results of the rifted basin model

度差是真实值的结果,若密度差取值不准确,是否会对位场边缘识别结果有影响?为此,分别给定密度差为 $-0.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和 $-0.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 进行反演计算,结果分别如图 3a 和 3c 所示,相应地 NVDR_THDR 处理结果如图 3b 和 3d 所示。当密度差不准确时,直接迭代法均能得到密度界面的起伏变化,尽

管其与理论模型的真实深度差别较大,但相对起伏变化是一致的。在此情形下,密度界面反演结果的 NVDR_THDR 计算结果与准确密度差时的处理结果几乎是一致的,均能较清晰地反映理论模型中次盆的边界位置。可见,密度差的选择几乎不会影响最终的位场边缘识别结果。

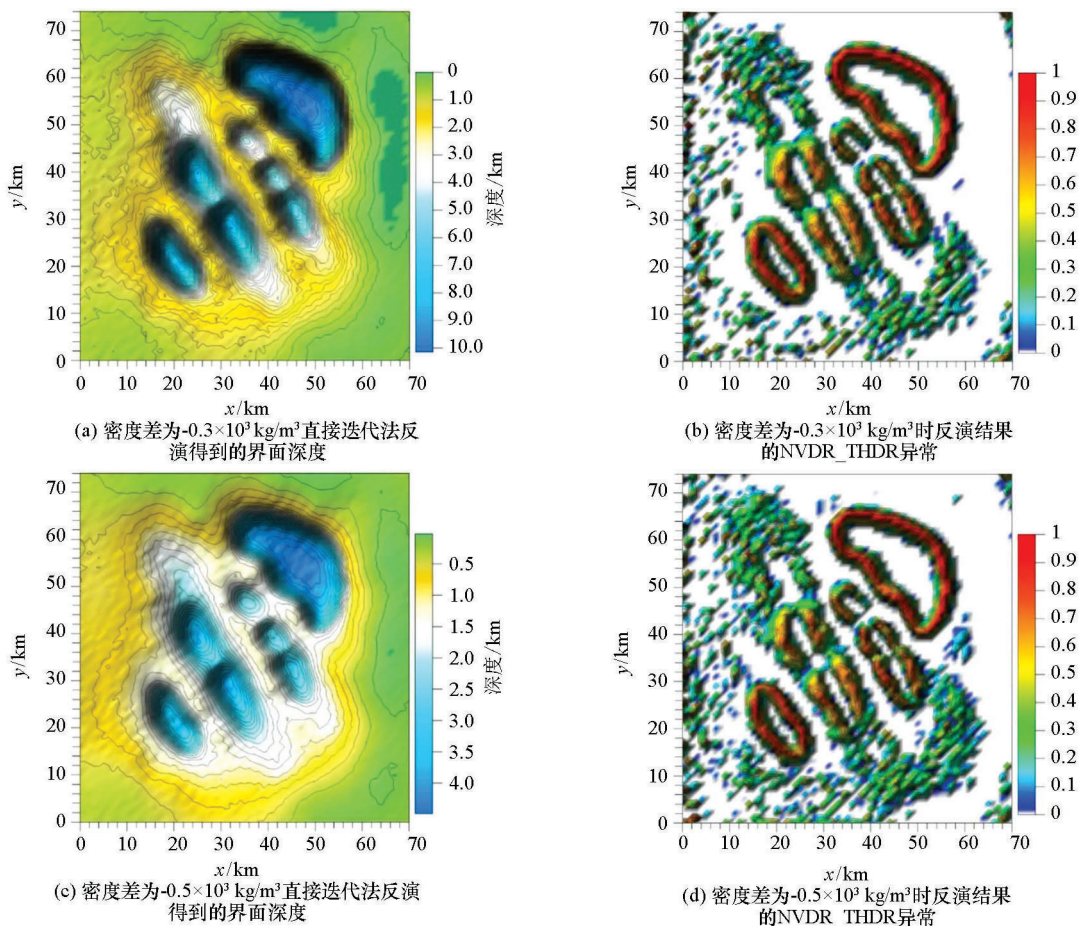


图 3 密度差不同时裂陷盆地模型位场边缘识别结果

Fig.3 The edge recognition results of the rifted basin model with different density contrasts

2.2 孤立形体组合模型

孤立形体组合模型如图 4 所示,该组合模型由 7 个大小不一、埋深不同的立方体组成,组合模型的观测面为 $z=0 \text{ km}$ 的平面, x 和 y 方向的范围均为 $0 \sim 20 \text{ km}$,观测面网格间距为 $0.25 \text{ km} \times 0.25 \text{ km}$,共 81×81 个观测点。正演计算该组合模型引起的重力异常,并加入均值为 0 、标准差为 $0.05 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 的高斯白噪声,最终得到的理论重力异常如图 4c 所示。

利用本文方法进行位场边缘识别时,需要将理论重力异常视为密度界面引起的重力异常并反演该“界面”的起伏变化,反演结果取决于界面上下密度差及界面平均深度。为保证反演的密度界面起伏变化与重力异常大小变化呈正相关以利于直观分析,密度差应取为负值。尽管盆地模型试验结果表明了

密度差几乎不影响最终的位场边缘识别结果,但应尽可能地保证界面反演结果较浅以使其横向分辨率较高。实际资料处理时可根据岩石物性特征选择一个符合实际情况的密度差即可,这里选为 $-0.25 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,界面平均深度取为 2 km ,反演结果如图 5a 所示,相应的 NVDR_THDR 处理结果见图 5b。为便于对比,本文亦分别计算了模型理论重力异常的 NVDR_THDR 垂向导数阶次为 1 和 2 的结果,见图 5c 和 5d。此外,裂陷盆地基底模型试验中,剩余重力异常和向下延拓重力异常的 NVDR_THDR 结果较佳,因此,本文也对孤立模型进行相同的处理,结果分别见图 5e 和 5f。

与理论重力异常(图 4c)相比,密度界面反演结果(图 5a)的形态更接近理论模型的位置和形态,利

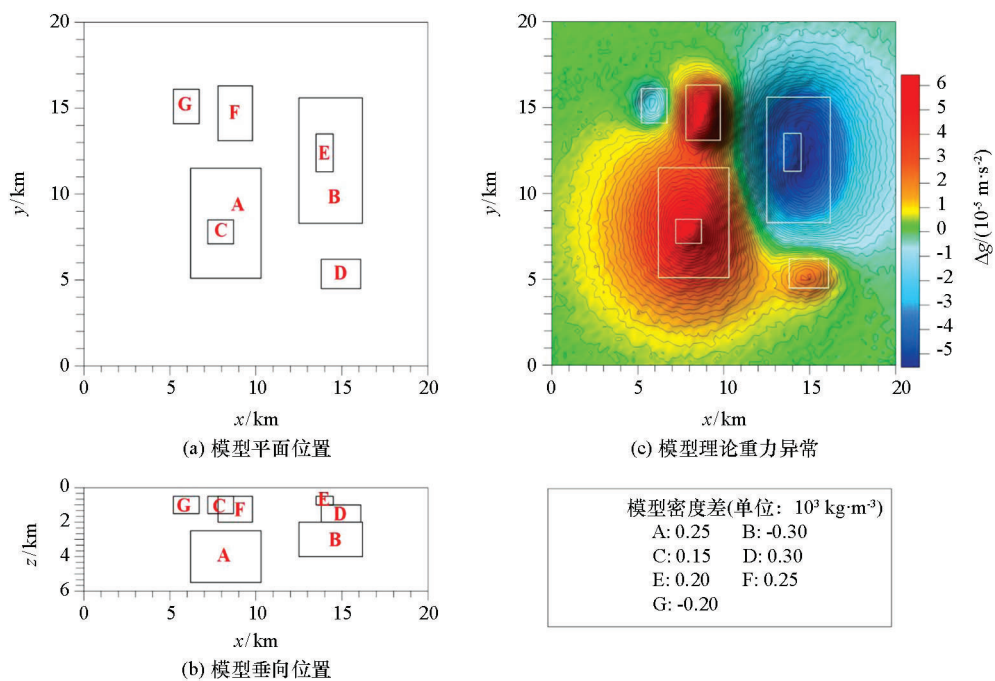


图 4 孤立形体组合及其重力异常

Fig.4 The combination model and its gravity anomaly

用 NVDR_THDR 技术处理的结果(图 5b)中,除模型 E 的左边界之外,浅部的 5 个模型 C~G 的边界较为清晰,深部模型 B 的边界位置也基本能识别出来。直接利用 NVDR_THDR 技术对理论重力异常的处理结果(图 5c)中,深部模型 B 的位置有所显示,但其右侧边界偏差较大;浅部模型中,仅能完整的识别 F 和 G 的边界。垂向导数阶次为 2 时 NVDR_THDR 处理结果(图 5d)中,异常的幅值较窄,更容易确定模型边界,且深部模型 B 的位置也更准确一些,但仍然无法完整识别浅部模型 C、D、E 的边界。剩余重力异常 NVDR_THDR 结果(图 5e)与本文方法计算结果(图 5b)较为相似,但异常极大值稍宽一些,模型 C 的边界也不太清晰。向下延拓重力异常 NVDR_THDR 结果(图 5f)可以清晰地反映浅部模型 C~G 的边界,甚至模型 E 的左边界也能显示出来,但对于深部模型 B 则无法有效反映,NVDR_THDR 的幅值与噪声相当。不难理解,重力异常向下延拓之后,可以突出浅部异常、压制深部异常,因此,处理结果中只能突出浅部异常的边界。可见,对于孤立形体的组合模型,本文方法的优势不如在盆地基底断裂识别中明显,但其在一定程度上可平衡深部和浅部异常的识别。

3 实际资料处理

为测试本文方法在实际资料处理中的效果,选

择鄂尔多斯盆地北部重力数据(图 6a)进行计算,该数据来源于区域 1:50 万实测布格重力异常。图 6b 为利用 NVDR_THDR 技术直接对布格重力异常的处理结果,研究区北部 NVDR_THDR 极大值以近 EW 向为主,其次是 NE 向和 NEE 向,极大值分布较为密集。研究区中部和南部 NVDR_THDR 极大值以 NW 向、EW 向和 NE 向为主,由于该区域重力异常变化相对较为平缓,因此 NVDR_THDR 的极大值分布较为稀疏。研究区西部 NVDR_THDR 极大值密集分布,走向以近 SN 向为主。

利用本文方法对研究区重力异常进行处理,反演时为得到深度较合理的密度界面,首先对布格重力异常添加常数的背景重力值,将其调整为 $(-120\sim 0)\times 10^{-5}\text{ m/s}^2$ 之间。之后,根据整个鄂尔多斯盆地的地层密度资料,并为保证反演界面尽量较浅以利于突出局部异常,给定密度差为 $-0.5\times 10^3\text{ kg/m}^3$,得到界面如图 6c 所示。利用 NVDR_THDR 技术对该界面处理结果如图 6d 所示,图中 NVDR_THDR 的极大值分布更密集一些,尤其在研究区中部和南部更为明显。研究区北部和西部的极大值分布与图 6b 中的较为相似,但异常幅值更窄,局部异常得到增强。

为进一步对比位场边缘识别结果,沿研究区的一条地震剖面^[48](图 6d 中黑色实线)提取了图 6b 和 6d 的处理结果,如图 7 所示。位场边缘识别结果仅能反映断裂或岩性边界的平面位置,因此 NVDR_

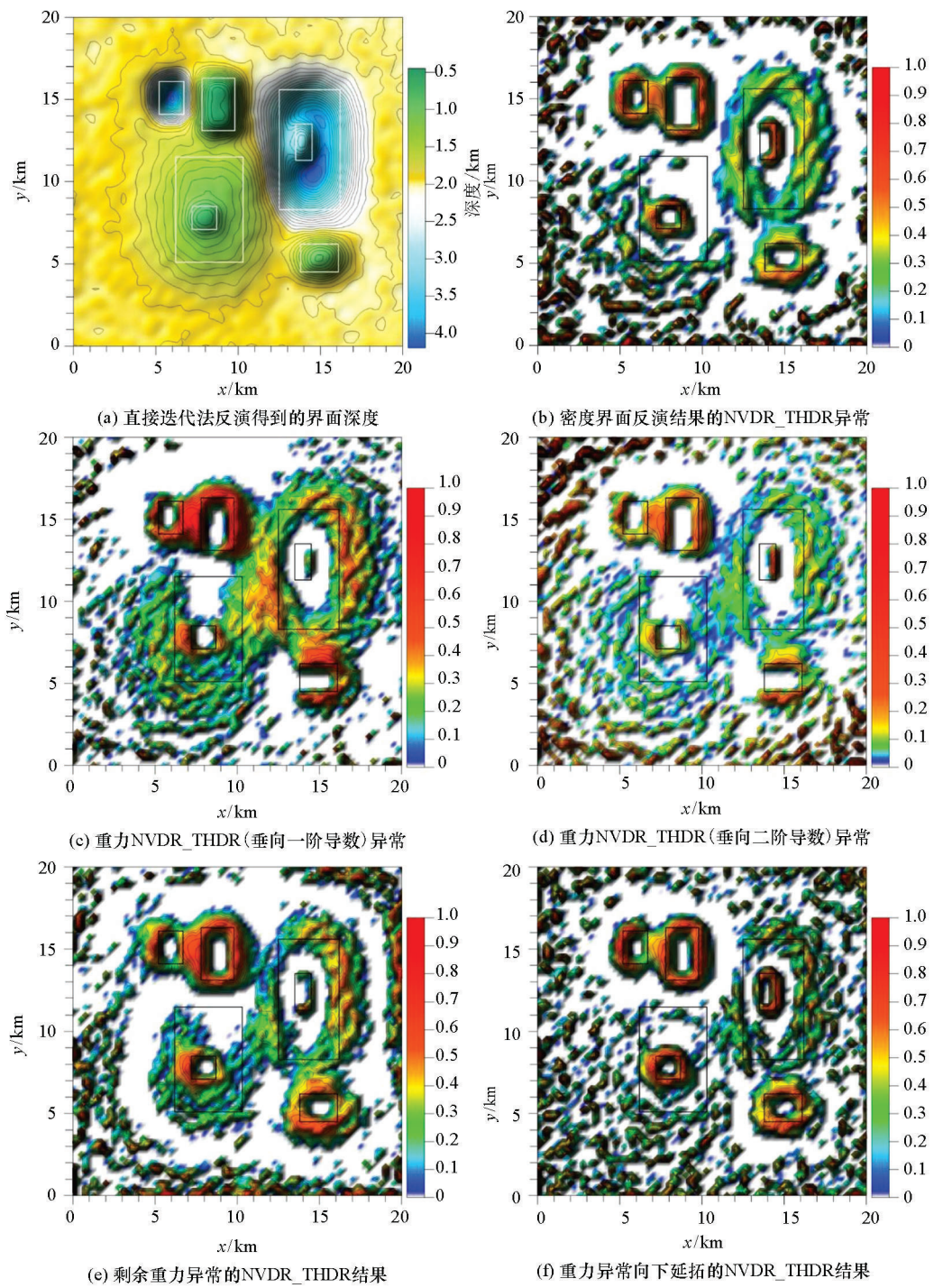


图 5 孤立形体组合模型位场边缘识别结果

Fig.5 The edge recognition results of the combination model

THDR 的极大值对应于断裂带中点偏上的某一个位置。图 7 中,断距较大的断裂附近重力异常 NVDR_THDR 和密度界面 NVDR_THDR 均为极大值,但重力异常 NVDR_THDR 无法有效识别断距较小的断裂。密度界面 NVDR_THDR 结果中,对于断距较小的断裂也能识别,例如剖面长度 110、140、160 km 处,这一特征尤为明显。可见,本文提出的基于界面

反演增强的位场边缘识别方法在实际资料处理也较为有效。需要说明的是,理论上,当断裂埋深较浅、断距较大时,其引起的重力异常梯度也越大,相应的 NVDR_THDR 的值也越大。但实际地质情况较为复杂,NVDR_THDR 的大小与断裂的规模、埋深以及断裂两侧的地层密度差等均有关,因此 NVDR_THDR 值的大小并不能完全反映断裂的埋深、规模等特征。

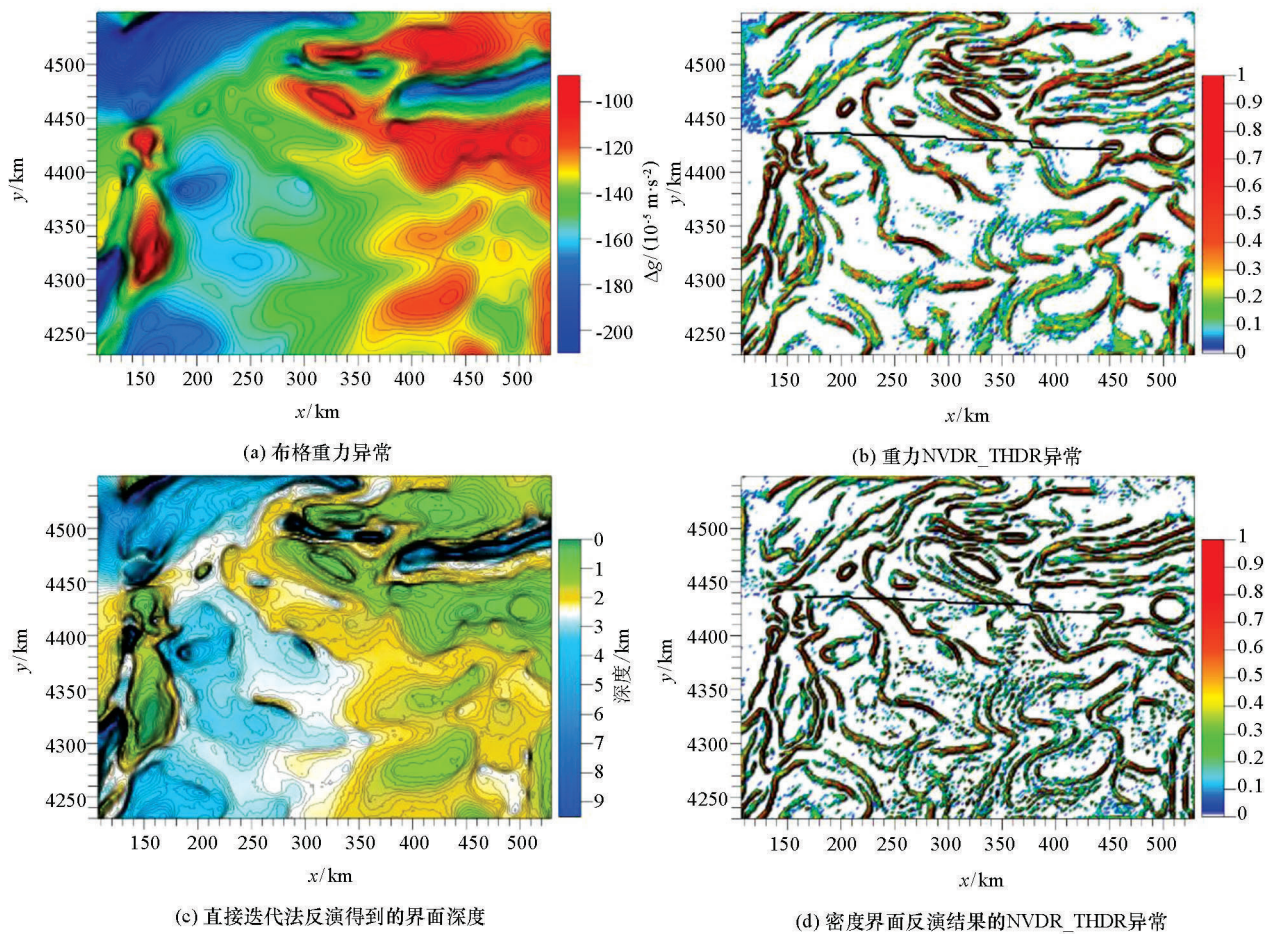


图 6 鄂尔多斯盆地北部重力异常及位场边缘识别结果

Fig.6 Gravity anomaly in northern Ordos Basin and the edge recognition results

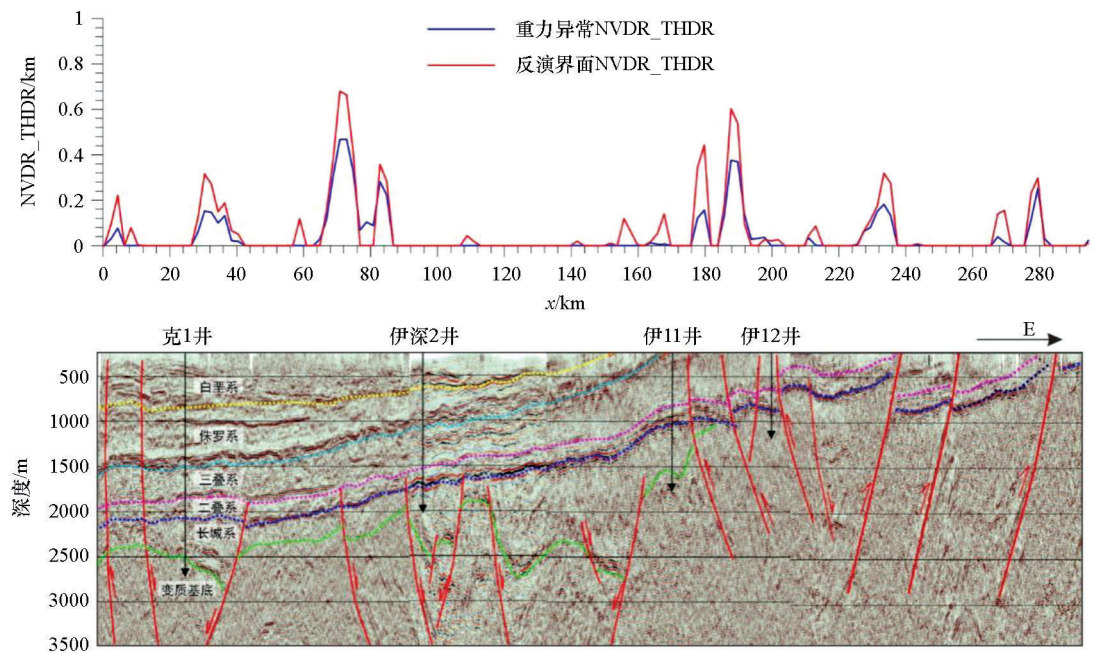


图 7 鄂尔多斯盆地北部位场边缘识别结果与地震剖面对比 (地震剖面据文献[48])

Fig.7 The comparison between the edge recognition results and the seismic profile in northern Ordos Basin
(The seismic profile is from reference [48])

4 结论

为增强位场边缘识别方法对于深部小规模地质体的识别能力,本文提出了一种基于界面反演增强技术,首先利用密度界面反演方法对重力异常进行处理,之后将 NVDR_THDR 技术作为一种边缘提取和增强技术对密度界面反演结果进行提取,其比直接对重力异常进行 NVDR_THDR 计算的效果更佳。裂陷盆地模型试验证明了该方法能较好地用于盆地基底断裂的识别,密度差的大小几乎不影响最终的边缘识别结果。将该方法应用于孤立形体组合模型试验,处理结果也与理论模型较为吻合,与其他增强方法相比,这一方法具有一定的优势。鄂尔多斯盆地实际资料处理结果也表明了本文方法可以更好地识别盆地基底小规模断裂,实际应用效果较好。

基于密度界面增强的位场边缘识别方法可以直接用于重力异常,但不能直接用于磁力异常处理。对于磁异常,可将其转化为磁源重力异常进行边缘识别,或将这一思路推广至磁力异常处理之中,将密度界面反演改为磁性界面反演,之后利用 NVDR_THDR 进行边缘提取和增强。

参考文献 (References):

- [1] 张遂泉.浅谈重力在有色金属矿区的地质效果[J].物探与化探,1990,14(5):393-396.
Zhang S Q. A rough discussion on geological effects of gravity survey in nonferrous metal districts [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1990, 14(5): 393-396.
- [2] 刘光鼎,郝天珧,刘伊克.重磁研究对认识盆地的意义[J].地球物理学进展,1996,11(2):1-15.
Liu G D, Hao T Y, Liu Y K. The significance of gravity and magnetic research for knowing sedimentary basins [J]. Progress in Geophysics, 1996, 11(2): 1-15.
- [3] 娄德波,宋国玺,李楠,等.磁法在我国矿产预测中的应用[J].地球物理学进展,2008,23(1):249-256.
Lou D B, Song G X, Li N, et al. The application of magnetic method in national mineral prediction [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(1): 249-256.
- [4] 阴江宁,肖克炎.物探方法在矿产预测中的应用[J].地质学刊,2012,36(3):333-336.
Yin J N, Xiao K Y. Application of geophysical exploration method in mineral resources prediction [J]. Journal of Geology, 2012, 36(3): 333-336.
- [5] 王万银,邱之云,杨永,等.位场边缘识别方法研究进展[J].地球物理学进展,2010,25(1):196-210.
Wang W Y, Qiu Z Y, Yang Y, et al. Some advances in the edge recognition of the potential field [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(1): 196-210.
- [6] Hood P, McClure D J. Gradient measurements in ground magnetic prospecting [J]. Geophysics, 1965, 30(3): 403-410.
- [7] Hood P J, Teskey D J. Aeromagnetic gradiometer program of the Geological Survey of Canada [J]. Geophysics, 1989, 54(8): 1012-1022.
- [8] Cordell L. Gravimetric express of graben faulting in Santa Fe Country and the Espanola Basin [C]// New Mexico: New Mexico Geol. Soc. Guidebook, 30th Field Conf., 1979:59-64.
- [9] Grauch V J S, Cordell L. Limitation of determining density or magnetic boundaries from the horizontal gradient of gravity or pseudo-gravity data [J]. Geophysics, 1987, 52(1): 118-121.
- [10] Nabighian M N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation [J]. Geophysics, 1972, 37(3): 507-517.
- [11] Nabighian M N. Toward a three dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations [J]. Geophysics, 1984, 49(6): 780-786.
- [12] Li X. Understanding 3D analytic signal amplitude [J]. Geophysics, 2006, 71(2): L13-L16.
- [13] Miller H G, Singh V. Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources [J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 32(2-3): 213-217.
- [14] Miller H G, Singh V. Semiquantitative techniques for the identification and removal of directional trends from potential field data [J]. Journal of Applied Geophysics, 1994, 32(2-3): 199-211.
- [15] 王想,李桐林.Tilt 梯度及其水平导数提取重磁源边界位置[J].地球物理学进展,2004,19(3):625-630.
Wang X, Li T L. Location the boundaries of magnetic or gravity sources with Tdr-Thdr methods [J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(3): 625-630.
- [16] Wijns C, Perez C, Kowalczyk P. Theta map: Edge detection in magnetic data [J]. Geophysics, 2005, 70(4): L39-L43.
- [17] Verduzco B, Fairhead J D, Green C M, et al. The meter reader-New insights into magnetic derivatives for structural mapping [J]. The Leading Edge, 2004, 23(2): 116-119.
- [18] 王彦国,罗潇,邓居智,等.基于改进 tilt 梯度的三维磁异常解释技术[J].石油地球物理勘探,2019,54(3):685-691.
Wang Y G, Luo X, Deng J Z, et al. 3D magnetic data interpretation based on improved tilt angle [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(3): 685-691.
- [19] Ekinci Y L, Ertekin C, Yigitbaş E. On the effectiveness of directional derivative based filters on gravity anomalies for source edge approximation: Synthetic simulations and a case study from the Aegean graben system (western Anatolia, Turkey) [J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2013, 10(3): 1-15.
- [20] 赵希刚,吴汉宁,柏冠军,等.重磁异常解释断裂构造的处理方法及图示技术[J].地球物理学进展,2008,23(2):414-421.
Zhao X G, Wu H N, Bai G J, et al. Magnetic and gravity data processing method and imaging techniques for faulted structure interpretation [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(2): 414-421.
- [21] 夏玲燕,吴汉宁,柏冠军,等.柴达木盆地航磁资料微弱信息增

- 强技术研究及在线性构造识别中的应用[J].地球物理学进展,2008,23(4):1058-1062.
- Xia L Y, Wu H N, Bai G J, et al. Research on enhancing weak signal technology and recognition of linear structures using aerial-magnetic data in the Qaidam Basin [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1058-1062.
- [22] 肖锋,吴燕冈,孟令顺.重力异常图中的边界增强和提取技术[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(4):1197-1203.
- Xiao F, Wu Y G, Meng L S. Edge enhancement and detection technology in gravity anomaly map [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(4): 1197-1203.
- [23] Hidalgo-Gato M C, Barbosa V C F. Edge detection of potential-field sources using scale-space monogenic signal: Fundamental principles [J]. Geophysics, 2015, 80(5): J27-J36.
- [24] Alamdar K, Rouhani A K, Ansari H. A new edge detection method based on the analytic signal of tilt angle (ASTA) for magnetic anomalies[C]// Istanbul International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition, 2012.
- [25] Cooper G R J. Reducing the dependence of the analytic signal amplitude of aeromagnetic data on the source vector direction [J]. Geophysics, 2014, 79(4): J55-J60.
- [26] 英高海,姚长利,郑元满,等.基于磁异常的边界特征增强方对比研究[J].地球物理学报,2016,59(11):4383-4398.
- Ying G H, Yao C L, Zheng Y M, et al. Comparative study on methods of edge enhancement of magnetic anomalies [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(11): 4383-4398.
- [27] 马国庆,杜晓娟,李丽丽.利用水平与垂直导数的相关系数进行位场数据的边界识别[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(S1):345-348.
- Ma G Q, Du X J, Li L L. Edge detection of potential field data using correlation coefficients of horizontal and vertical derivatives [J]. Journal of Jilin University: Earth Sciences Edition, 2011, 41(S1): 345-348.
- [28] 马国庆,杜晓娟,李丽丽.位场数据边界识别的新方法——增强型水平导数法[J].地球物理学进展,2013,28(1):402-408.
- Ma G Q, Du X J, Li L L. New edge detection method of potential field data-enhanced horizontal derivative method [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(1): 402-408.
- [29] Ma G, Liu C, Li L. Balanced horizontal derivative of potential field data to recognize the edges and estimate location parameters of the source [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 108: 12-18.
- [30] 王彦国,张凤旭,刘财,等.位场垂向梯度最佳自比值的边界检测技术[J].地球物理学报,2013,56(7):3463-3472.
- Wang Y G, Zhang F X, Liu C, et al. Edge detection in potential fields using optimal auto-ratio of vertical gradient [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7): 3463-3472.
- [31] Du W, Wu Y, Guan Y, et al. Edge detection in potential field using the correlation coefficients between the average and standard deviation of vertical derivatives [J]. Journal of Applied Geophysics, 2014, 143: 231-238.
- [32] 于平,张琦,张冲.基于水平方向解析信号的均衡重力位场边界识别方法[J].地球物理学报,2019,61(10):3734-3743.
- Yu P, Zhang Q, Zhang C. A new method of balanced edge detection for the gravity potential-field based on horizontal analytical signal [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 61(10): 3734-3743.
- [33] 郭灿文,郇恒飞,马永.利用水平导数与垂向导数标准偏差的相关系数法识别磁源边界[J].地质与勘探,2020,56(2):418-426.
- Guo C W, Huan H F, Ma Y. Identification of magnetic source boundaries using correlation coefficients of standard deviation of horizontal and vertical derivatives [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(2): 418-426.
- [34] Pham L T, Oksum E, Do T D. Edge enhancement of potential field data using the logistic function and the total horizontal gradient [J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2019, 54: 143-155.
- [35] 王赛昕,刘林静.均值归一化总水平导数边界识别方法[J].工程地球物理学报,2011,8(6):699-704.
- Wang S X, Liu L J. Edge detection by equalized and normalized amplitude of total horizontal derivatives [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(6): 699-704.
- [36] Ma G, Li L. Edge detection in potential fields with the normalized total horizontal derivative [J]. Computers & Geosciences, 2012, 41: 83-87.
- [37] 李丽丽,黄大年,韩立国.归一化总水平导数法在位场数据解释中的应用[J].地球物理学报,2014,57(12):4123-4131.
- Li L L, Huang D N, Han L G. Application of the normalized total horizontal derivative (NTHD) in the interpretation of potential field data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(12): 4123-4131.
- [38] Li L, Huang D, Han L. Normalized edge detection, and the horizontal extent and depth of geophysical anomalies [J]. Applied Geophysics, 2014, 11(2): 149-157.
- [39] Wang W, Pan Y, Qiu Z. A new edge recognition technology based on the normalized vertical derivative of the total horizontal derivative for potential field data [J]. Applied Geophysics, 2009, 6(3): 226-233.
- [40] 王万银,冯旭亮,高玲举,等.重磁方法在图尔库班套铜镍矿区勘查中的应用[J].物探与化探,2014,38(3):423-429.
- Wang W Y, Feng X L, Gao L J, et al. The application of gravity and magnetic techniques to the prospecting for the Tuerkubantao copper-nickel ore district [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 423-429.
- [41] 张菲菲,王万银,杨金玉,等.根据重力数据研究南海北部陆缘断裂带的延伸问题[J].地球物理学进展,2014,29(5):2113-2119.
- Zhang F F, Wang W Y, Yang J Y, et al. Research on the extension of faults zones in northern margin of the South China Sea based on the gravity data [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(5): 2113-2119.
- [42] 罗新刚,王万银,张功成,等.基于重力资料的南海及邻区断裂分布特征研究[J].地球物理学报,2018,61(10):4255-4268.
- Luo X G, Wang W Y, Zhang G C, et al. Study on distribution features of faults based on gravity data in the South China Sea and its adjacent areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61

(10): 4255–4268.

[43] 赵强.归一化总水平导数垂向导数法在位场数据解释中的应用[J].物探与化探,2018,42(2):374–380.

Zhao Q. The application of normalized total horizontal derivative vertical derivative method to the interpretation of in situ data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(2): 374–380.

[44] Bott M P H. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basin [J]. Geophysical Journal Royal Astronomical Society, 1960, 3(1): 63–67.

[45] Silva J B C, Santos D F, Gomes K P. Fast gravity inversion of basement relief [J]. Geophysics, 2014, 79(5): G79–G91.

[46] Feng X, Wang W, Yuan B. 3D gravity inversion of basement relief for a rift basin based on combined multinorm and normalized vertical derivative of the total horizontal derivative techniques [J]. Geophysics, 2018, 83(5): G107–G118.

[47] 冯旭亮,袁炳强,李玉宏,等.渭河盆地基底三维变密度重力反演[J].石油地球物理勘探,2019,54(2):461–471.

Feng X L, Yuan B Q, Li Y H, et al. Basement depth estimation based on gravity anomalies in Weihe Basin with 3D variable density contrast model [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(2): 461–471.

[48] 包洪平,邵东波,郝松立,等.鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化[J].地学前缘,2019,26(1):33–43.

Bao H P, Shao D B, Hao S L, et al. Basement structure and evolution of early sedimentary cover of the Ordos Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 33–43.

An edge recognition technique enhanced with interface inversion for potential field data

FENG Xu-Liang^{1,2}, WEI Ze-Kun^{1,2}

(1.Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2.School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract: One of the pivotal tasks in energy and resources exploration is identifying geological boundaries such as petroliferous structure, ore-controlling faults, and rock mass boundaries. The edge recognition of gravity and magnetic potential data has unique advantages in the detection of geological boundaries, and has become an indispensable and important means in energy and resources exploration. We have combined interface inversion and normalized vertical derivative of the total horizontal derivative (NVDR_THDR) for potential field data to improve the effect of the potential field edge recognition method for deep small-scale geological bodies. Firstly, we invert the gravity anomaly using density interface inversion method to make the anomaly more prominent of the small-scale geological structures, then the NVDR_THDR technique is used as an edge extraction and enhancement method to deal with the density interface inversion result. The results conducted with rifted basin model and the isolated bodies model show that the proposed method has obvious advantages of edge enhancement and can balance the deep and shallow anomalies to some extent. The real gravity data test of the northern Ordos Basin also show that our method can detect the small-scale faults in the basement of the basin, which indicates that this method can be successfully used in real data processing.

Key words: edge recognition; density interface inversion; gravity anomaly; edge enhancement

(本文编辑:王萌)