

大型油气藏重力异常提取组合技术

刘 展¹, 陈晓红¹, 张 刚², 王志敏³

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏南京 210007;
3. 中石化胜利油田采油工艺研究院, 山东东营 257000)

摘要:在分析各类油气藏基本特征的基础上,建立背斜、断层、尖灭和岩体刺穿组合复杂油气藏理论模型,运用趋势分析、差值切割、小波分析和细胞神经网络等识别方法提取油气重力异常信息,通过对比各种方法的优劣,形成一套基于油气成藏模式进行油气藏重力信息提取的组合技术。通过对三湖坳陷涩北地区的实际资料处理,辅以重震联合解释、重力异常正则化下延和视密度成像技术,验证了异常提取组合方法的有效性。结果表明,该技术可以克服单一提取方法的缺陷,提高异常提取的可靠性,减少油气预测的多解性。

关键词:成藏模式; 重力异常提取; 趋势分析; 差值切割; 小波分析; 细胞神经网络

中图分类号:P 312.9

文献标志码:A

Combined extraction technology of gravity anomaly of large reservoir

LIU Zhan¹, CHEN Xiao-hong¹, ZHANG Gang², WANG Zhi-min³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. East China Mineral Exploration and Development Bureau, Nanjing 210007, China;
3. Shengli Oil Production Research Institute, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Based on the analysis of basic characteristics of various types of oil and gas reservoirs, some kinds of theoretical reservoir models were established considering four complex reservoirs that include anticlines, faults, pinchout and rock body piercing. Four identifying methods, i. e. trend analysis, difference cutting, wavelet analysis and cellular neural network were used to extract oil and gas gravity anomaly information. These methods were compared and then a combined extraction technology was formed based on the oil and gas reservoir model. The effectiveness of the combined extraction method was verified by processing actual data in Sebei, Three-lake region. The results show that the new method overcomes many shortcomings in popular single extraction methods, improves the reliability of the anomaly extraction, and reduces multiple solutions in the oil and gas prediction. The robustness of the combined extraction method was verified by comparing multiple techniques combining gravity and seismic joint interpretation technology, gravity anomaly regularization downward-continuation technology and apparent density imaging technology.

Key words: reservoirs mode; gravity anomaly extraction; trend analysis; difference cutting; wavelet analysis; cellular neural network

油气重力异常信息提取是在油气藏区域构造背景下识别并提取出相对油气重力负异常的信息。目前国内外普遍采用滑动迭代趋势分析法、灰色预测理论、高阶统计量、插值切割法、小波分析法和人工神经网络等方法^[1-2]提取油气重力异常信息。这些方法虽然在应用中取得了一定效果,但单一方法均

存在其局限性:①趋势分析中多项式的“阶数”是人为选取,无客观标准,随意性较强,因此当研究区较大或研究区存在的断裂、断块较多、区域异常与局部异常的变化较复杂时,采用一个趋势面难以有效拟合区域异常,出现虚假异常的几率大;②插值切割法大多用来识别孤立、分散的金属矿体或火成岩体异

常,当存在复杂异常时,多解性严重,且该方法只能分离异常,不能识别异常源;③小波分析法可根据地质目的来组合小波细节,实现有地质意义的异常分解,但如何根据叠加异常特征确定小波的阶数也存在多解性问题;④神经网络方法能够突出浅层异常,但目前还难以根据目标局部重力异常特征来训练模板^[3]。上述油气重力信息提取技术采用常规单一的方法进行异常分离,没有结合油气成藏模式,难以克服多解性和准确识别构造或油气引起的异常。为了有效地提取油气信息、确保异常提取的可靠性,需要在分析钻井和物性资料的基础上^[4],结合研究区的成藏模式^[5-6],优化组合多种异常提取方法。因此,笔者研究多次滑动趋势分析、插值切割、小波分析和细胞神经网络方法的优化组合技术,并采用多种提取技术进行相互验证。

1 基本理论

研究目标区的油气成藏模式可以减少油气预测的多解性,正反演等技术可以很好地确定目标区域的构造模式并识别异常源,可以用密度界面正反演技术、视密度及视磁化强度三维成像技术等先进手段,综合利用地震、钻井等数据探寻研究区的构造模式,确定地质构造模式和异常源的形态;在获得研究区的油气藏成藏模式的基础上,再利用异常提取方法优化组合提取技术,进行重力异常信息提取,获取油气重力异常信息,提高油气预测的准确性。本文中主要介绍运用趋势分析、差值切割、小波分析和细胞神经网络4种识别方法提取油气重力异常信息的基本理论。

1.1 多次滑动趋势分析法

趋势分析法为采用一个多项式拟合区域异常,达到分离区域异常和局部异常的目的。当研究区范围较大、地形及地质构造较复杂时,只用一个趋势面拟合区域异常与实际情况相差太多,容易提取出虚假的油气异常,面对这种复杂情况可采用变阶滑动窗口法来进行异常分离。

1.1.1 基本原理

首先计算小窗口的1~4阶多项式系数和它的趋势面 $g_a(x, y)$,然后根据均方差最小的原则,利用趋势面和实测布格异常值 g 数据计算最需的趋势面方程的阶数。

$$\sigma_j = \left[\sum_{i=1}^N (g_i - g_{ai})^2 / (N - n - 1) \right]^{1/2}. \quad (1)$$

式中, σ_j 为均方差; N 为计算点数; n 为多项式系数个数; j 为多项式阶数($j=1, 2, 3, 4$)。

趋势面方程 $g(x, y)$ 表达式如下:

$$\begin{aligned} g(x, y) = & B(0, 0) + B(1, 0)\Phi_1(x) + B(0, 1)\Psi_1(y) + \\ & B(2, 0)\Phi_2(x) + B(0, 2)\Psi_2(y) + B(3, 0)\Phi_3(x) + \\ & B(0, 3)\Psi_3(y) + B(4, 0)\Phi_4(x) + B(0, 4)\Psi_4(y) + \\ & B(1, 1)\Phi_1(x)\Psi_1(y) + B(2, 1)\Phi_2(x)\Psi_1(y) + \\ & B(1, 2)\Phi_1(x)\Psi_2(y) + B(3, 1)\Phi_3(x)\Psi_1(y) + \\ & B(1, 3)\Phi_1(x)\Psi_3(y) + B(2, 2)\Phi_2(x)\Psi_2(y). \end{aligned} \quad (2)$$

其中多项式系数可以写为

$$B(K, L) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Phi_K(x_i) \Psi_L(y_j) g(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m [\Phi_K(x_i) \Psi_L(y_j)]^2}.$$

正交多项式为

$$\begin{aligned} \Phi_0(x_i) &= 1, \Psi_0(y_j) = 1, \\ \Phi_1(x_i) &= x_i - \bar{x}, \Psi_1(y_j) = y_j - \bar{y}, \\ &\dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{K+1}(x_i) &= \Phi_K(x_i) \Phi_1(x_i) - K^2(n^2 - \\ & K^2) \Phi_{K-1}(x_i) / 4(4K^2 - 1), \\ \Psi_{L+1}(y_j) &= \Psi_L(y_j) \Psi_1(y_j) - L^2(m^2 - \\ & L^2) \Psi_{L-1}(x_i) / 4(4L^2 - 1). \end{aligned}$$

式中, $\bar{x}$ 为窗口中包含 x 点的平均值; $\bar{y}$ 为窗口中包含 y 点的平均值; n 为 x 方向逼近点数; m 为 y 方向逼近点数; (x_i, y_i) 为 i 点的坐标位置; K 为 x 方向阶数; L 为 y 方向阶数^[27]。

1.1.2 滑动窗口和步长确定的基本原则

(1) 通常状态下,滑动窗长短的选取和目标区的地质构造相关,一般窗口设置长度为目标异常体的1/2至1倍最佳,窗口过大会把背景异常信息混入剩余异常中。

(2) 趋势分析的滑动步长通常选一个或者两个点距或线距,步长过大趋势面会不光滑。当数据量很大而且密度较高时应该将滑动步长调大,从而减少计算量。

1.2 插值切割法

插值切割法可将重力异常中起伏不平的干扰或者有效异常平滑掉,首先获得光滑的区域异常,然后用原始场值减去已经得到的区域场值得到局部异常,达到分离局部和区域异常的目的,从而压制干扰。插值切割算子受位场值曲率变化的影响,本研究将半二阶差分引入到切割算子中,因此该算法对不同非线性异常的作用不同,属于非线性滤波方法,提高了对抗干扰能力。假设实测异常为 $V_0(t)$,

切割半径为 r , 定义:

$$V_1(t) = \frac{V_0(t+r) + V_0(t-r)}{2}, \tag{3}$$

$$\Delta V_1(t) = V_0(t) - \frac{V_0(t+r) + V_0(t-r)}{2}, \tag{4}$$

$$\Delta V_2(t) = V_0(t+r) - V_0(t-r). \tag{5}$$

假如 $\Delta V_1(t)$ 和 $\Delta V_2(t)$ 不同时为零, 则可求取插值系数 A :

$$A = \frac{[\Delta V_2(t)]^2}{[\Delta V_1(t)]^2 + [\Delta V_2(t)]^2}. \tag{6}$$

若 $\Delta V_1(t) = \Delta V_2(t) = 0$, 则令 $A = 1$ 。

定义压制干扰的切割算子为当前计算点的实测异常值与其圆周二点平均值的关系^[7]:

$$V_2(t) = V_1(t) + A[V_0(t) - V_1(t)]. \tag{7}$$

1.3 小波分析法

利用小波分析处理异常的原理是对小波函数进行平移、伸缩等运算, 获得小波序列, 重构逼近异常信号, 达到异常分离的目的。小波分析能处理傅里叶变换解决不了的某些问题。用小波分析技术分离油气藏重力异常信息需要针对油气藏异常的不同特点选取恰当的小波函数, 不同的小波函数适用构造不同。选择小波函数处理变化较为平滑的重力场时可以考虑振荡平缓的小波母函数, 此外还要考虑对称性、紧支撑性等因素。

对于油气藏重磁异常分离类型, 发现油气资源主要是通过获取剩余异常的方法, 采用具有较高消失矩和对称特性的小波母函数, 常用的有 4 种小波母函数: bior3.5 小波、Haar 小波、bin17.9 小波和 db4 小波。各类小波特性见表 1。

表 1 各类小波特性

Table 1 Some kinds of wavelet properties

小波类型	正交性	紧支撑性	消失矩阶数	对称性
Haar	✓	✓	1	✓
db4	✓	✓	4	×
bior3.5	双正交	✓	2	×
bin17.9	双正交	✓	6	×

与子信号具有较高相似性的小波函数更适合用于异常分类, 通过将获得的小波函数的互协方差与建立的油气藏模型的正演场值相互比对, 可以得出与子信号的相似性程度, 分析发现 bior3.5 小波的相似性程度高, 能够用于提取油气异常。

1.4 细胞神经网络法

细胞神经网络法的原理是首先将实测的重力异常作为细胞神经网络的输入, 将油气引起的异常作为期望输出, 然后调整初始权值进行优化, 再用优化

获得的权值识别油气引起的异常, 从而实现异常分离。本研究第一步是分析目标区的油气藏成藏模式, 进而设计相应的油气藏模型, 利用细胞神经网络训练模板, 即为将设计模型的油气异常作为期望输出, 把实测重力异常作为输入, 调整权值使输入逐渐逼近期望输出, 输出与期望输出二者之间存在误差函数, 当此误差函数小于预设学习精度时候, 则停止修正权值, 此时非油气异常被当做干扰信号处理, 保证目标异常识别的正确性。优化得到的权值是算法所需要的模板, 用这些模板处理实际重力资料, 识别油气异常。

设计了 5 类模板进行异常信息识别, 用于确定初始权值选取。模板类型分别为直线型、下凹型、余弦曲线型等。

模板 1: $\omega_0 = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$,
 $\omega = \{0.009\ 562, 0.009\ 562, 0.009\ 562, 0.155\ 391, 0.155\ 371, 0.155\ 381, -0.011\ 383\}$ 。

模板 2: $\omega_0 = \{0, 0, 0.01, 0.02, 0.01, 0, 0\}$,
 $\omega = \{0.000\ 423, 0.000\ 423, 0.010\ 423, 0.027\ 715, 0.017\ 771, 0.007\ 745, -0.000\ 504\}$ 。

模板 3: $\omega_0 = \{0, 0, -0.01, -0.02, -0.01, 0, 0\}$,
 $\omega = \{0.012\ 998, 0.012\ 998, 0.002\ 998, 0.191\ 067, 0.201\ 028, 0.211\ 048, -0.015\ 474\}$ 。

模板 4: $\omega_0 = \{0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07\}$,
 $\omega = \{0.008\ 249, 0.018\ 249, 0.028\ 249, 0.012\ 002, 0.022\ 038, 0.032\ 021, 0.072\ 084\}$ 。

模板 5: $\omega_0 = \{0, 0, -0.1, 0, 0.1, 0, 0\}$,
 $\omega = \{0.010\ 895, 0.010\ 895, -0.089\ 105, 0.177\ 006, 0.276\ 979, 0.176\ 993, -0.012\ 971\}$ 。

为了识别重力油气藏模型的叠加异常, 采用细胞神经网络法的上述模板提取剩余异常。为了较好地突出目标异常和识别异常体的边界, 需要选择与目标异常形态类似且较小的数值作为初始权值。

优选确定初始权值后, 利用细胞神经网络法提取剩余异常有两类方法: 压制区域场和压制浅层干扰。压制区域场是通过叠加异常和油气异常进行权值优化和异常提取, 该方法能够压制背景场; 压制浅层干扰是通过叠加异常和背景异常进行权值优化, 该方法能够压制浅层干扰。这两类方法分别用如下模板 1 和模板 2 异常提取过程进行分析。

压制区域场模板 1: $\omega_0 = \{0.01, 0, -0.01,$

$-0.02,-0.01,0,0.01\}$,
 $\omega=\{0.023\ 008,0.013\ 008,0.002\ 998,0.191\ 226,$
 $0.201\ 187,0.211\ 207,-0.005\ 486\}$.

压制浅层干扰模板 2: $\omega_0=\{0,0.005,0.01,$
 $0.02,0.01,0.005,0\}$,
 $\omega=\{0.007\ 423,0.012\ 446,0.017\ 453,0.140\ 682,$
 $0.130\ 645,0.125\ 663,-0.008\ 864\}$.

分析发现,压制区域场模板 1 中有明显的大幅值油气异常,部分区域场被成功压制;压制浅层干扰模板 2 中有明显光滑的区域异常,为典型的背斜油气藏背景异常,浅层异常被成功压制,获得的异常与已知模型相吻合。由此可见,细胞神经网络法能够降低干扰并且获得需要的异常信息。

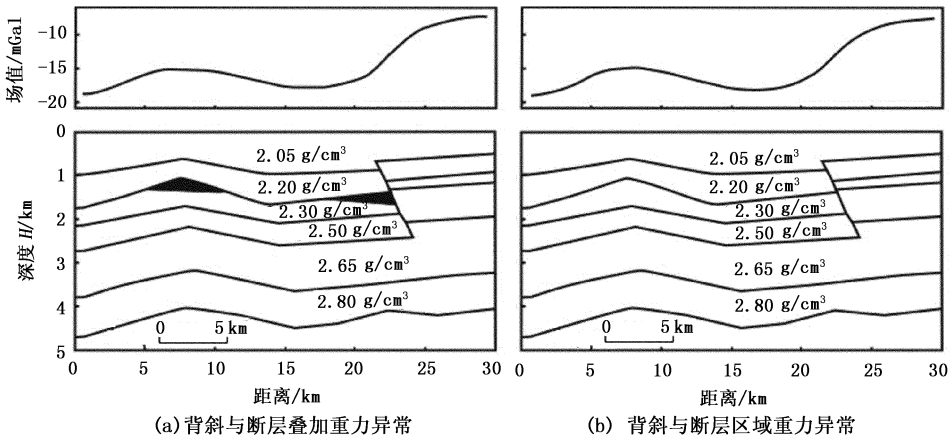


图 1 背斜和断层组合油气藏重力模型示意图
Fig.1 Skematic drawing of gravity model in anticline and fault composite reservoirs

从图 2 可以看出,4 种方法都能在一定程度上识别出背斜和断层组合油气藏油气异常信息,每种方法的具体参数见每条异常曲线的右上角。背斜油气藏的油气存在于异常的两峰值之间,波峰极大值为油气边界,波谷极小值为油气中心位置,4 种方法提取的异常均有很好的反应。相比之下,断层油气藏的油气存在于异常曲线和零直线两交点之间,交点为油气边界。趋势分析法和细胞神经网络法识别油气异常较为清晰,能较准确指示油气异常边界,插值切割法识别的油气边界与真实边界有少许偏离,提取的异常幅值偏小,而小波分析法识别效果最不理想,但该方法提取的异常幅值最大,突出了存在的重力异常,适合用于识别弱重力异常。

基于上述分析可以得出,背斜和断层组合油气藏在处理实际资料时适合采用趋势分析法和细胞神经网络法为主、插值切割法和小波分析法为辅的异常提取组合方法,该组合方法在识别油气异常的同时还可以获得油气的分布信息。

2 组合油气藏理论模型研究

建立两种组合油气藏理论模型,对背斜和断层组合油气藏以及尖灭和岩体刺穿组合油气藏进行研究^[8]。

2.1 背斜和断层油气藏

图 1 为设计的背斜和断层组合油气藏重力模型。图 1(a) 中阴影区为含油气区域,密度较小,为 2.1 g/cm³,上部对应重力异常为构造作用和油气重力异常叠加的结果;图 1(b) 为不含油气时的油藏构造及相应的重力异常。可以看出,左侧含油气重力异常稍稍低于不含油气的异常,断层处这种特点更为明显。

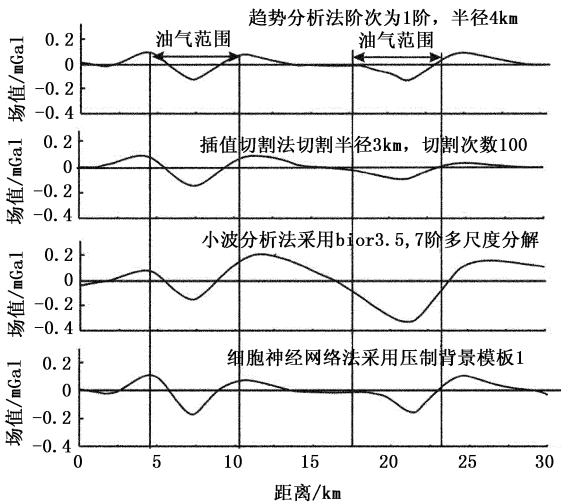


图 2 4 种方法提取剩余重力异常对比图
Fig.2 Comparison of residual gravity anomaly extracted by four extraction methods

2.2 尖灭和岩体刺穿油气藏

图 3 为尖灭和岩体刺穿组合油气藏重力模型,设计的模型参数同前,以此为基础进行了重力正演计

算。

从图 4 可以看出,4 种方法都能在一定程度上识别尖灭和岩体刺穿组合油气藏油气异常信息,每种方法的具体参数见每条异常曲线的右上角。细胞神经网络法对模型左侧尖灭油气藏的识别效果较

好,边界位置正好处于异常曲线和零点的交点,而趋势分析法所识别的异常曲线更加符合实际。插值切割法对模型右侧岩体刺穿油气藏的识别效果较好,可以较好地指示油气的分布信息。小波分析法识别效果最不理想,但该方法提取的油气异常幅值最大。

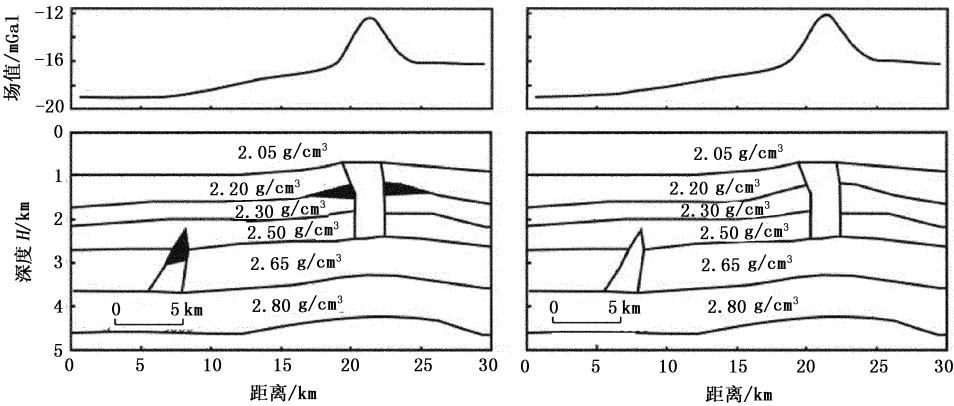


图 3 尖灭和岩体刺穿组合油气藏重力模型示意图

Fig. 3 Schematic drawing of gravity model in pinchout and rock body piercing composite reservoirs

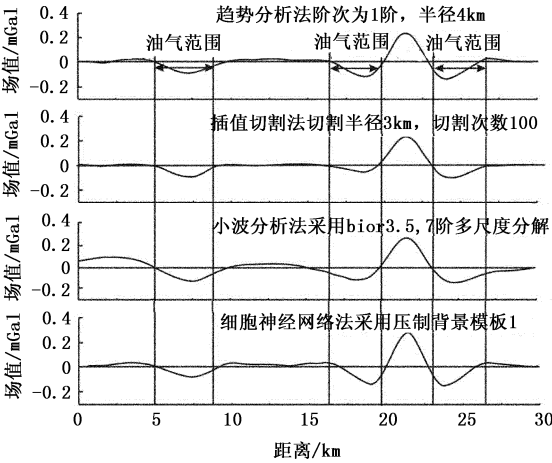


图 4 4 种方法提取剩余重力异常对比图

Fig. 4 Comparison of residual gravity anomaly extracted by four extraction methods

基于上述分析可以得出,尖灭和岩体刺穿组合油气藏在处理实际资料时适合采用以插值切割法、趋势分析法和细胞神经网络法为主,小波分析法为辅的异常提取组合方法。

2.3 组合方法对比

在上述两组模型研究的基础上,本文对 4 类油气藏的重力异常提取方法组合进行了对比总结,结果见表 2(其中,√表示主要方法,○表示辅助方法)。

4 种方法都能较好地识别背斜油气藏油气异常,趋势分析法与细胞神经网络法可以更好地识别断层油气藏异常,差值切割法与细胞神经网络法识别尖灭油气藏异常效果较好,趋势分析、差值切割和

细胞神经网络 3 种方法均可较好应用于岩体刺穿油气藏,小波分析法效果相对较差。总体上可以看出,细胞神经网络法适应性较好,在设计的 4 种油气藏模型中都表现出较好的效果,其次是趋势分析和插值切割技术也在 3 种油气藏中取得了较好的试验结果。虽然小波分析法对油气的边界检测精度较低,但是适用于识别弱重力异常。

表 2 4 种复杂油气藏的重力异常提取方法组合对比

Table 2 Comparison of combination methods in four reservoirs

方法	背斜 油气藏	断层 油气藏	尖灭 油气藏	岩体刺穿 油气藏
趋势分析	√	√	○	√
差值切割	√	○	√	√
小波分析	√	○	○	○
细胞神经网络	√	√	√	√

3 实际资料处理

柴达木盆地三湖坳陷上新统第四系内的天然气藏资源量大,地球物理特征突出,且埋藏深度浅、厚度大、孔隙度大,地层密度亏损较大,油气负异常、地震速度异常及频率异常等普遍存在。图 5 为该坳陷涩北研究区高精度重力 GJ000 测线位置和井位分布图,该测线穿过台南、涩北 1 号、涩北 2 号 3 个已知气田,其上的黑色三角为井位分布,为确定油气藏模式并验证方法的有效性提供了所需的实际资料。

基于油气成藏模式,采用组合提取技术提取该测线的油气信息。首先结合地震和钻井资料,建立区域

构造模式,运用重力正反演程序拟合该测线^[9-10],从而获得如图 6(a)所示的油气成藏模式。其次根据该油气成藏模式,设计合理参数,采用组合提取技术提取测线油气异常。

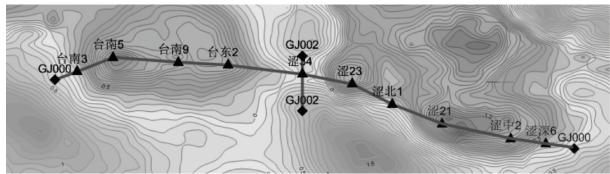


图 5 涩北研究区 GJ000 测线位置和井位分布图
Fig.5 Location of measured GJ000 line and wells in Sebei work area

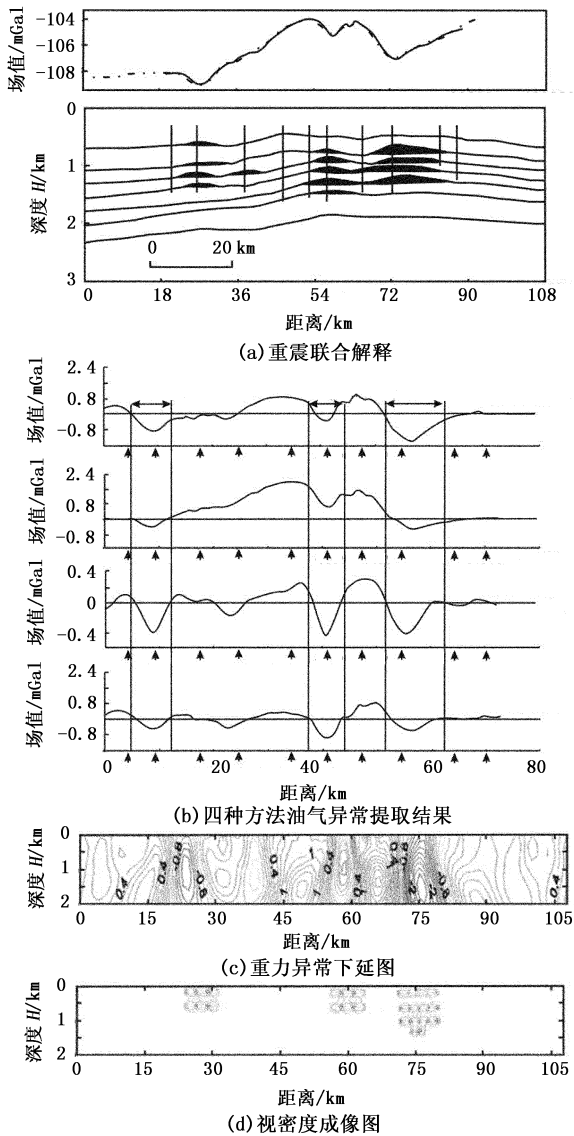


图 6 GJ000 测线油气提取与识别结果
Fig.6 Extraction and recognition results of oil and gas by GJ000 measured line

分析发现,该研究区属于基底稍微倾斜的背斜型油气藏,因此选择背斜油气藏模式,采用细胞神经

网络、插值切割、趋势分析、小波分析组合方法识别和提取异常,具体参数同图 2。如图 6(b)所示,该组合方法能够有效提取油气剩余重力异常,重力低幅度与研究区天然气藏资源量相对应,细胞神经网络法可以较好地识别重力异常,趋势分析法也可以在一定程度上识别油气的异常边界,通过方法间的相互验证,增强了结果的可靠性,并能确定油气的空间分布范围。为了更准确地确定异常源的深度和大体形状,同时也验证组合技术的有效性,利用双正则化下延技术和视密度反演成像技术^[11]识别测线的异常信息,结果见图 6(c)和图 6(d)。从油气藏的定量解释可以看出,结果与已知气田的对应关系好,证实了基于油气成藏模式的异常组合提取技术可以有效提取油气藏重力信息。

4 结 论

- (1) 4 种重力异常分离方法的优缺点对比研究表明,趋势分析对油气异常的边界有很好的识别效果,小波分析法虽对油气边界的检测不够准确,但是反映油气异常相对幅度大,适用于提取弱重力异常。细胞神经网络方法广泛适用于多种油气藏,适用范围广,其次是趋势分析和插值切割方法。
- (2) 建立了适合于识别几类油气藏类型的最佳方法组合模式,形成了一套基于油气成藏模式进行油气藏重力信息提取与识别的组合技术。
- (3) 通过对三湖坳陷涩北地区的实际资料处理,辅以重震联合解释、重力异常正则化下延和视密度成像技术,验证了运用多种方法组合进行重力异常提取的可靠性和有效性。该组合技术还可以减少工作量,提高油气预测的准确性。

参考文献:

[1] AGHAJANI H, MORADZADEH A, ZENG Hua-lin. Estimation of depth to salt domes from normalized full gradient of gravity anomaly and examples from the USA and Denmark[J]. Journal of Earth Science, 2009,20(6): 1012-1016.

[2] 宋双, 刘天佑, 苏俊青. 重磁小波多尺度分解及在火山岩识别中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2008,5(6): 675-679.

SONG Shuang, LIU Tian-you, SU Jun-qing. The wavelet multi-scale decomposition of gravity and magnet and its application in the identification of volcanic rock[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008,5(6): 675-679.

- [3] 刘展, 刘茂诚, 魏巍, 等. 基于细胞神经网络方法的重力异常分离[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010,34(4):57-61.
LIU Zhan, LIU Mao-cheng, WEI Wei, et al. Gravity anomaly separation based on cellular neural network[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(4):57-61.
- [4] WANG Xin-sheng, FANG Jian. Three-dimensional crustal density distribution beneath North China by sequential inversion of local earthquake travel times and gravity anomaly[J]. Earthquake Science, 2011,24:135-141.
- [5] 刘展, 班丽, 魏巍, 等. 济阳拗陷花沟地区火成岩重磁成像解释方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(1):30-34.
LIU Zhan, BAN Li, WEI Wei, et al. A method of inverting igneous rock by gravity and magnetic imaging in Huagou area of Jiyang depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(1):30-34.
- [6] SANDWELL D T, SMITH W H F. Global marine gravity form retracked Geosat and ERS-1 altimetry: ridge segmentation versus spreading rate[J]. Journal of Geophysical Research, 2009,114,B01411.
- [7] 段本春, 范典高. 利用插值切割法研究磁性基底局部起伏特征[J]. 石油物探, 1999,38(4):89-95.
DUAN Ben-chun, FAN Dian-gao. Studying the local relief characters of magnetic basement by the interpolation-cut method[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1999,38(4):89-95.
- [8] 张刚. 油气重磁异常识别及提取方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学地球科学与技术学院, 2011.
ZHANG Gang. The method research of identification and extraction of oil gravity and magnetic anomalies [D]. Qingdao: School of Geosciences in China University of Petroleum, 2011.
- [9] CORDELL L, HENDERSON G. Iterative three-dimensional solution of gravity anomaly data using a digital computer [J]. Geophysics, 1968,33:596-601.
- [10] OLDENBURG D W. The inversion and interpretation of gravity anomalies[J]. Geophysics, 1974,39:526-536.
- [11] SUN Lu-ping, LIU Zhan, SHOU Hao. Parameter optimization of gravity density inversion based on correlation searching and the golden section algorithm[J]. Applied Geophysics, 2012(9):131-138.
- (编辑 修荣荣)