文章编号：1004—5589（2018）01—0224—08

基于导数迭代法的重力归一化总梯度

李银飞，张凤旭，郜振华，郝梦成

吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要：针对传统重力归一化总梯度方法对油气藏分辨率不够和深度计算精度较低的问题，本文利用导数迭代法的向下延拓结果，计算重力归一化总梯度。将传统方法和本文方法同时用于模型试验，分析谐波数 N、埋深和充满系数对 G^H 场特征的影响。结果表明，相比于传统方法，本文方法受谐波数 N 的影响较弱，G^H 场对油气藏的分辨率更高，反演的油气藏深度更加准确。通过实际应用，证实了本文方法的有效性。

关键词：重力归一化总梯度；导数迭代法；谐波数；埋深；充满系数

中图分类号：P631.1；P618.13　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.020

Normalized full gradient of gravity based on derivative-iteration method

LI Yin-fei, ZHANG Feng-xu, TAI Zhen-hua, HAO Meng-cheng

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Aiming at solving the problem of low resolution and precision for the detection of oil reservoirs by normalized full gradient of gravity, the authors use downward continuation of the derivative iterative method to calculate normalized full gradient of gravity. The Fourier transform and this method are both used in the model tests. The influence of harmonic number N, depth and fullness coefficient on G^H field are analyzed. The results show that compared with Fourier transform, this method is less affected by the influence from harmonic number N, and the resolution of G^H field to reservoirs is higher and the inversed depth is more accurate. The validity of the method is verified by practical application.

Key words: normalized full gradient of gravity; derivative-iteration method; harmonic number; depth; fullness coefficient

0 引言

重力归一化总梯度法具有不需要预先知道场源剩余密度来确定场源、断裂位置及密度分界面的优点[1,2]，广泛应用在石油勘探中，用来半定量的圈定油气藏构造以及为井位的确定提供佐证[3]。

重力归一化总梯度是由某深度的梯度模与这一深度的平均梯度模相除得到。由此可见，计算重力归一化总梯度场的关键是向下延拓和导数计算。根据位场转换理论，导数计算由异常的频谱乘以方向导数响应因子[4]。向下延拓是个不适定问题，现有延拓方法在位场向下接近场源时会产生剧烈震荡，计算过程很不稳定，理论上不能越过场源[5,6]。为增强计算稳定性，傅里叶级数法、傅里叶变换法和希尔伯特变换法等在重力归一化总梯度的向下延拓计算过程中附加了圆滑因子，有效地解

收稿日期：2017-03-16；**改回日期**：2017-12-07

基金项目：中国地质调查局项目（HYJJ2014003）.

通讯作者：张凤旭（1969-），男，教授，主要从事位场数据处理方法技术研究. E-mail：fxzhang 16@163.com

决了计算的不稳定[7-9]。然而圆滑因子中的谐波数 N 会使 G^H 场指示的地质体埋深发生变化，谐波数 N 越大，G^H 场反映的埋深越浅，反之越深[3,4,10,11]，这影响了 G^H 法的准确度。

针对向下延拓问题，学者们提出了一系列波数域改进措施。这些改进算法大致可以分为两类，一类是在向下延拓算子中附加低通滤波因子[7,12,13]，但是这类算法计算所需的最佳滤波参数往往难以选择，造成对观测异常的压制过度或者对高频的压制不够，降低了转换精度；另一类是使用迭代补偿原理实现向下延拓，主要包括积分迭代法[14]、泰勒级数迭代法[15]和导数迭代法[16]等。相比于前者，迭代法无需给定滤波参数，只需迭代误差达到阈值即可。

为提高重力归一化总梯度法的准确度，本文利用导数迭代法计算的向下延拓结果改进重力归一化总梯度。通过模型试验，对比了本文算法与传统傅里叶变换法的计算结果，分析了谐波数 N、油气藏埋深及充满系数对本文算法计算结果的影响。

1　基本原理

1.1　重力归一化总梯度法

别列兹金提出的重力归一化总梯度公式为[1]：

$$G^H(x,z) = \frac{\sqrt{V_{zx}^2(x,z) + V_{zz}^2(x,z)}}{\frac{1}{M}\sum_{0}^{M-1}\sqrt{V_{zx}^2(x,z) + V_{zz}^2(x,z)}} \quad (1)$$

式中：G^H（x，z）为 z 深度的重力归一化总梯度值；V_{zx}（x，z）、V_{zz}（x，z）为重力 g 对 x 和 z 的偏导数；M 为 x 方向的采样点数。

传统方法在波数域向下延拓和导数换算中附加了圆滑因子 P_n[1]：

$$P_n = \left[\frac{\sin\frac{\pi m}{N}}{\frac{\pi m}{N}}\right]^n \quad (2)$$

式中：N 为谐波数；m 为采样序数；n 为圆滑因子指数，在石油勘探中一般取 2[2]。

1.2　向下延拓的导数迭代法

导数迭代法由迭代思想结合垂向一阶导数推导而来[16]。设 u（x，y，0）是已知的观测面位场值，u（x，y，$-h$）是 u（x，y，0）向上延拓 h 高度的位场值，u（x，y，h）是 u（x，y，0）向下延拓 h 深度的位场值，是待求量。位场垂向一阶导数可定义为：

$$\Delta u_z(x,y) = \frac{u(x,y,0) - u(x,y,-h)}{h} \quad (3)$$

或者：

$$\Delta u_z(x,y) = \frac{u(x,y,0) - u(x,y,h)}{-h} \quad (4)$$

联立（3）、（4）式得到：

$$u(x,y,h) = 2u(x,y,0) - u(x,y,-h) \quad (5)$$

那么，向下延拓 h 深度平面上异常的初值可以表示为：

$$u(x,y,h)^0 = 2u(x,y,0) - u(x,y,-h) \quad (6)$$

利用位场向上延拓公式，由 u^0（x，y，h）可求得观测面和观测面向上延拓 h 高度平面位场的一阶近似值：

$$u^1(x,y,0) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{u^0(\xi_1,\eta_1,h)h\mathrm{d}\xi_1\mathrm{d}\eta_1}{[(\xi_1-x)^2+(\eta_1-y)^2+h^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

$$u^1(x,y,-h) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{u^0(\xi_1,\eta_1,h)2h\mathrm{d}\xi_1\mathrm{d}\eta_1}{[(\xi_1-x)^2+(\eta_1-y)^2+(2h)^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

利用公式（6），即采用 u（x，y，0）与 u^1（x，y，0）的差值及 u（x，y，$-h$）与 u^1（x，y，$-h$）的差值作为对 u^0（x，y，h）的补偿校正，得到向下延拓 h 深度平面上异常的一阶近似值：

$$u^1(x,y,h) = u^0(x,y,h) + 2[u(x,u,0) - u^1(x,u,0)] - [u(x,u,-h) - u^1(x,u,-h)] \quad (9)$$

重复以上步骤，便得到向下延拓的迭代格式：

$$u^{n+1}(x,y,h) = u^n(x,y,h) + 2[u(x,u,0) - u^{n+1}(x,u,0)] - [u(x,u,-h) - u^{n+1}(x,u,-h)] \quad (10)$$

为计算方便，通过傅里叶变换得到导数迭代法的波数域迭代格式：

$$U^{n+1}(u,v,h) = U(u,v,0)(2 - e^{-2\pi h\sqrt{u^2+v^2}}) + U^n(u,v,h)(1 - e^{-2\pi h\sqrt{u^2+v^2}})^2 \quad (11)$$

式中：$U^{n+1}(u, v, h)$、$U(u, v, 0)$、$U^n(u, v, h)$ 分别为 $u^{n+1}(x, y, h)$、$u(x, y, 0)$ 和 $u^n(x, y, h)$ 的傅里叶变换谱；u，v 分别为 x，y 方向的波数。当公式 11 的计算结果满足 $\max | U^{n+1}(u, v, h) - U^n(u, v, h) | < \xi$（$\xi$ 为允许的最大误差）时，停止迭代。对 $U^{n+1}(u, v, h)$ 进行傅里叶反变换，即可得到向下延拓 h 深度的异常值。

2 模型试验

本文设计了如图 1 所示的非均匀球冠模型，用于模拟背斜构造油气藏。模型正演重力异常的计算公式见文献［17］。引入充满系数衡量背斜模型中的油气含量，计算方式为：

$$\beta = \frac{H_1 - h}{H_2 - h} \quad (12)$$

式中：h 为背斜顶面的埋深；H_1 为油气与围岩分界面的埋深；H_2 为背斜底面的埋深。本次试验中，球冠半径 R、观测点距、油气及围岩的剩余密度均保持不变，依次为 2 000 m、100 m、-0.1 g/cm^3 和 0.1 g/cm^3。

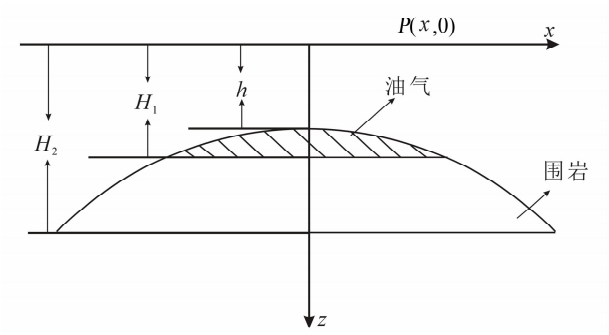


图 1 二度体背斜球冠断面图

Fig. 1 Cross-section of 2D anticlinal *h* ydrocarbon reservoirs

2.1 谐波数 N 对 G^H 场的影响

为了分析谐波数 N 对传统和改进重力归一化总梯度法计算结果的影响，设定模型参数 H_2 = 2 000 m，h = 1 500 m，β = 0.3，模型的正演重力异常见图 2。

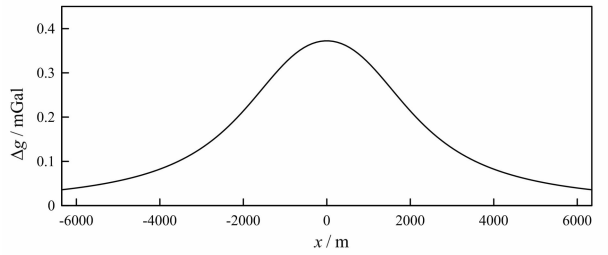


图 2 油气藏模型正演重力异常

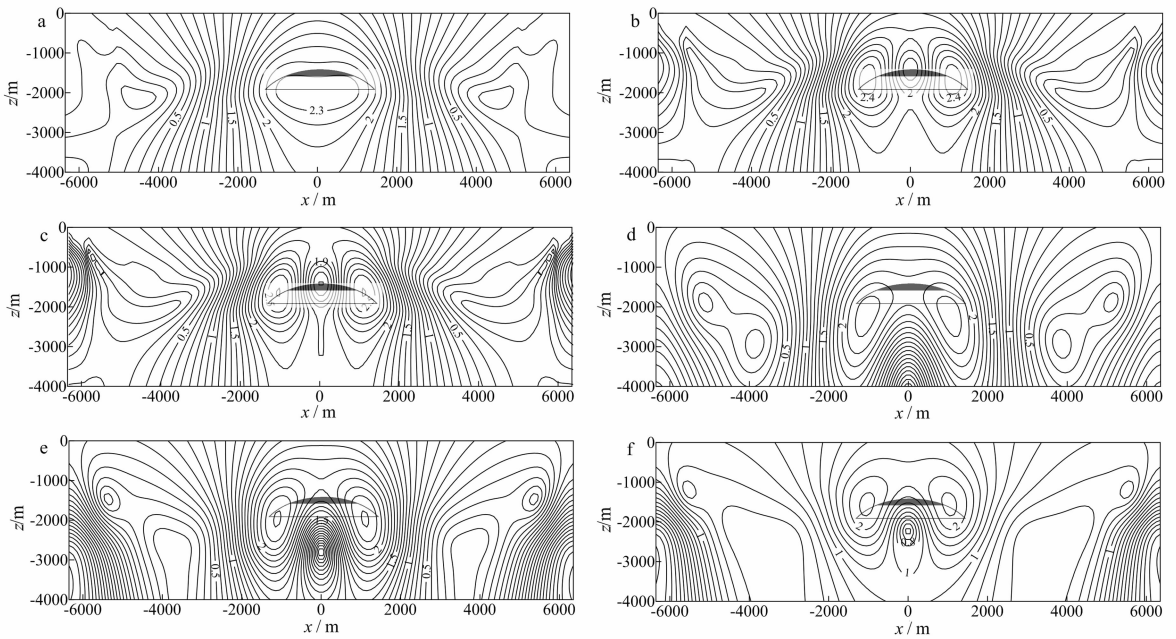
Fig. 2 Forward gravity anomaly of reservoirs models

从图 3 可以看出，背斜型油气藏 G^H 场特征会随谐波数 N 的变化而变化。谐波数 N 增大，传统和改进算法对油气藏的分辨率均有提高。从 N = 20 到 N = 40（图 3a－b），本文方法计算的的 G^H 场形态从中间轻微凹陷的椭圆变为“两高夹一低”特征，中间凹陷或极小值圈闭与油气层位置对应，两端高值与背斜两端对应。从 N = 40 到 N = 60（图 3b－c），G^H 场形态基本保持不变，唯一的变化是“两高夹一低”的高值更高，低值更低，分辨率变高，等值线最高值从 2.5 变到 2.6，最低值从 1.8 变为 1.5。从 N = 20 到 N = 60，本文算法识别出的“两高夹一低”（或中间凹陷的椭圆）极小值圈闭始终与油气层的位置保持一致。然而，反观传统方法的处理结果（图 3d－f），G^H 场指示的油气藏埋深依赖于谐波数 N 的选取，并且表现出一定的规律：谐波数 N 越大，G^H 场反映的油气藏埋深变浅。这与前人的研究一致[3,4,10,11]。

以上对比分析表明，相比于传统方法，利用本文方法计算的 G^H 指示的埋深对谐波数 N 的依赖减弱，对油气藏的分辨率越高，计算的埋深更加准确。

2.2 背斜型油气藏埋深与 G^H 场特征的关系

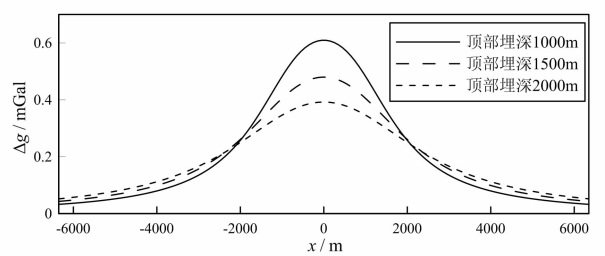
为了对比分析传统算法和改进算法对不同深度油气藏的识别效果，设定充满系数 β = 0.2，顶部埋深分别为 1 000 m、1 500 m 和 2 000 m，获得的正演重力异常如图 4 所示。可以看出，随着背斜模型顶部埋深的增加，产生的重力异常更加平缓，幅值降低。为了对比的公平性，传统算法和改进算法均达到了最佳的计算效果（图 5）。



a－c 是本文方法的计算结果；d－f 是传统方法的计算结果（a：$N=20$，b：$N=40$，c：$N=60$，d：$N=20$，e：$N=25$，f：$N=30$）.

图 3　谐波数 N 对背斜型油气藏 G 场特征的影响

Fig. 3　Influence of harmonic number N on anticline reservoirs G^H field



$h=1\ 000$ m，$H_2=1\ 500$ m；$h=1\ 500$ m，$H_2=2\ 000$ m；
$h=2\ 000$ m，$H_2=2\ 500$ m.

图 4　不同埋深油气藏模型的正演重力异常

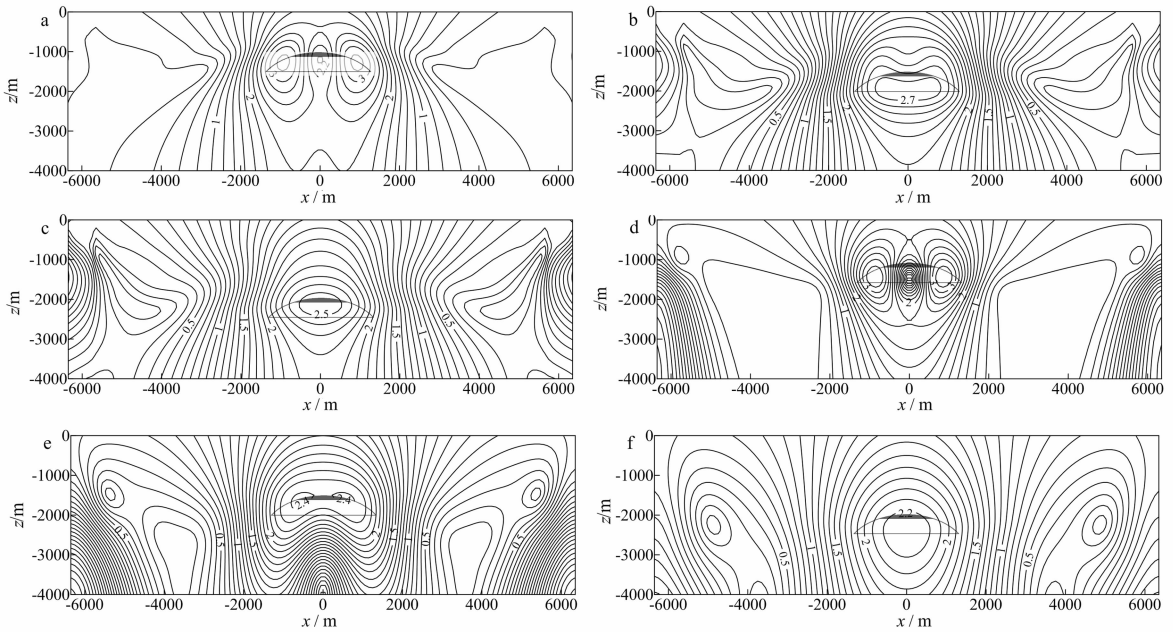
Fig. 4　Forward gravity anomaly of reservoir models with different depths

由图 5 可以看出，两种计算方法的 G^H 场特征均会随埋深的变化而变化，埋深越深，对油气藏的分辨率越低。当 $h=1\ 000$ m 时，不同于传统算法（图 5d），改进算法计算的 G^H 场（图 5a）中的“两高夹一低”特征与油气藏位置一致，中间低值对应油气藏，对应 G^H 场最低值 2.2，两侧高值对应背斜两端，对应 G^H 场最高值 3.2；当 $h=1\ 500$ m 时，相比于传统方法（图 5e），改进算法识别的油气藏“两高夹一低”特征更加明显（图 5b），只是该低值与油气位置存在一定偏差；当 $h=2\ 000$ m 时，两种算法计算的 G^H 场均不存在“两高夹一低”特征（图 5c、f），出现这种现象的原因可能是因为油气含量较低且深度较大造成的。但是，在背斜构造的圈定方面，改进算法的高值圈闭与背斜构造对位置精度依然优于传统方法。

分析表明，对于不同深度的油气藏，改进方法的识别精度均优于传统方法。当深度过大且油气含量较低时，虽然改进方法无法给出油气层的具体深度，但是依然可以很好的圈定出含油气背斜构造的位置。

2.3　充满系数与 G^H 场特征的关系

为了进一步对比改进算法和传统算法对不同油气含量背斜构造的识别效果，为此固定 $H_2=2\ 000$ m，$h=1\ 500$ m，充满系数从 0.1 到 0.2，再到 0.3，计算了模型产生的重力异常（图 6）。可以看出，受油气的负值剩余密度影响，当油气含量增加后，背斜模型顶部产生的重力异常幅值降低。针对不同的油气含量模型，改进算法和传统方法均调整为最佳效果（图 7）。



a－c 是本文方法的计算结果；d－f 是传统方法的计算结果（a，d：h=1 000 m，H_2=1 500 m；b，e：h=1 500 m，H_2=2 000 m；c，f：h=2 000 m，H_2=2 500 m. a：N=40；b：N=60；c：N=40；d：N=40；e：N=25；f：N=17）.

图 5 G^H 场特征与油气藏埋深的关系

Fig. 5 Relationship between reservoirs depth and G^H field

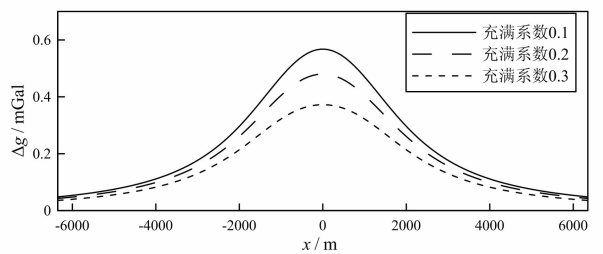


图 6 不同油气含量油气藏模型的正演重力异常

Fig. 6 Forward gravity anomaly of reservoir models with different contents

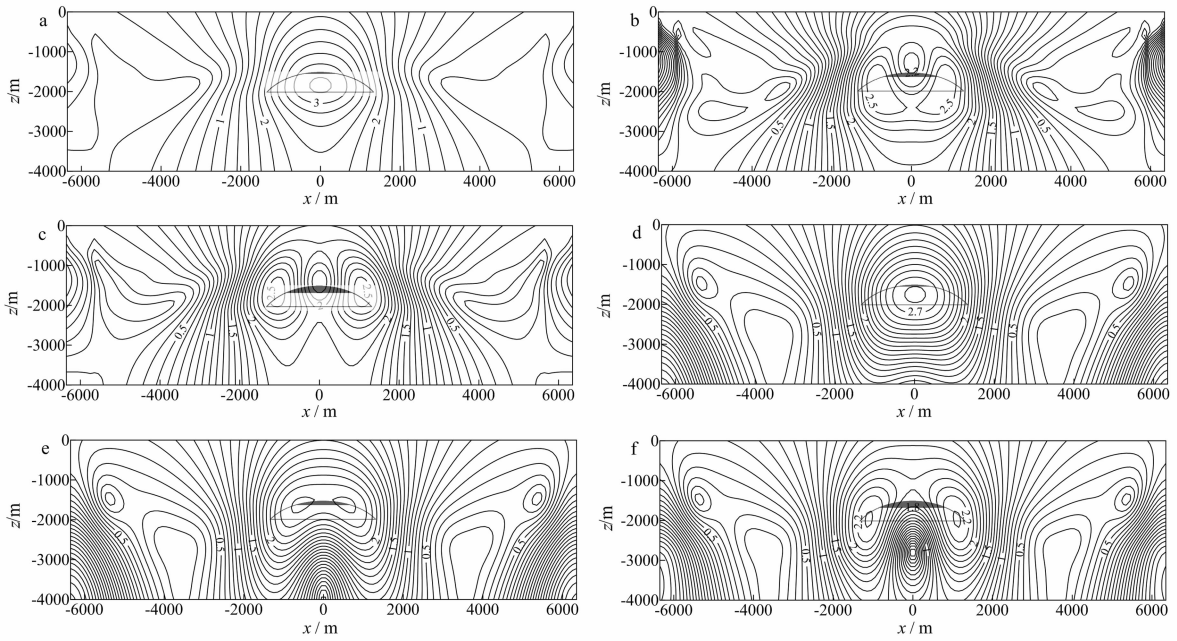
两种方法的计算结果（图 7）表明，随着油气含量的增加，G^H 场中“两高夹一低”的特征越发明显。当油气含量较少时，两种方法均无法识别出油气特征（图 7a、d）；当 β 达到 0.2 时，改进算法可以识别“两高夹一低”特征（图 7b），而传统方法依然无明显油气特征（图 7d）；当 β 达到 0.3 后，两种方法获得的 G^H 场中均有“两高夹一低”的特征（图 7c、f），但是相比于传统方法，改进算法识别的油气深度与真实深度吻合度更高。

3 实例应用

本文选取松辽盆地内一条长 50 km 的实测布格重力异常（图 8）。测线的测量点距为 0.5 km，在测线的 22～23.5 km 处为已开采的油气区。傅立叶变换法反演计算的重力归一化总梯度场值如图 9a 所示，导数迭代法反演计算的重力归一化总梯度场值如图 9b 所示。从图中可以看出，导数迭代法反演的结果在 23 km 处出现“两高夹一低”的特征，与油井区位置对应，而傅立叶变换法在油井区无明显特征。同时，在 9 km、15 km、32 km 及39 km处均出现“两高夹一低”的储油特征，推测其为油气构造分布区。傅立叶变换法反演结果在 10 km 和 30 km 处显示“两高夹一低”，这在导数迭代法反演结果中均有显示。可以看出，导数迭代法反演结果的分辨率较傅立叶变化法要高。

4 结论

（1）改进算法中谐波数 N 的影响被减弱，计算的 G^H 场能更准确地指示油气藏埋深，且谐波数



a－c 是本文方法的计算结果；d－f 是传统方法的计算结果（a，d：$\beta=0.1$；b，e：$\beta=0.2$；c，f：$\beta=0.3$. a：$N=40$，b：$N=60$，c：$N=40$，d－f：$N=25$）.

图 7　充满系数与 G^H 场特征的关系

Fig. 7　Relationship between fullness coefficient and G^H field

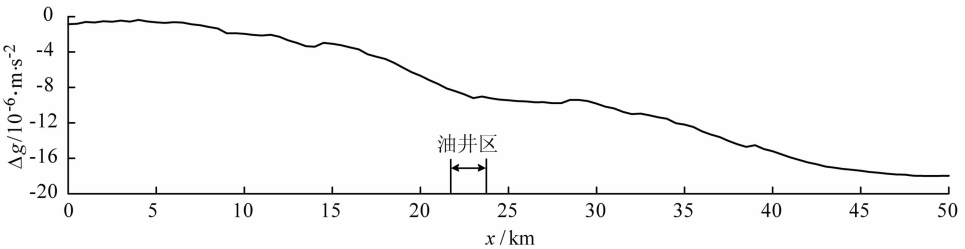
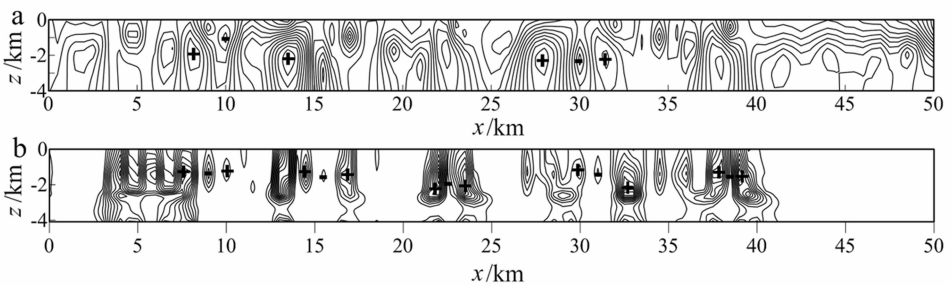


图 8　实测布格重力异常

Fig. 8　Measured Bouguer gravity anomalies



a：傅立叶变换法 b：导数迭代法.

图 9　实测重力异常反演结果

Fig. 9　Inversion results of measured gravity anomalies

N 越大，G^H 场中“两高夹一低”的特征更加明显，对油气藏的分辨率越高。

（2）油气藏埋深越大，改进算法与传统方法的 G^H 场中“两高夹一低”特征减弱，对油气藏的分辨率有所降低，但是埋深对改进算法的负面影响弱于传统方法。

（3）随着背斜构造中油气含量减少，改进算法与传统方法的 G^H 场中“两高夹一低”特征减弱，对油气藏的分辨率降低，但是改进算法对油气含量的敏感度弱于传统方法。

致谢 感谢张凤旭教授的悉心指导和严格监督。同时，感谢邰振华博士和郝梦成博士的指导，以及在程序编写和图形绘制中给予的帮助。

参考文献：

[1] 别列兹金 B M. 物探数据的总梯度解释法［M］. 陆克，刘文锦，焦恩富，译. 北京：地质出版社，1994：1-26.
Bereskin B M. Interpretation method of normalized full gradient to geophysical data［M］. LU Ke, LIU Wen-jin, JIAO En-fu, translated. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-26.

[2] 焦新华，吴燕冈. 重力与磁法勘探［M］. 北京：地质出版社，2009：87-90.
JIAO Xin-hua, WU Yan-gang. Gravity and geomagnetism exploration［M］. Beijing: Geological Publishing House, 2009: 87-90.

[3] ZENG Hua-lin, MENG Xiao-hong, YAO Chang-li, et al. Detection of reservoirs from normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil field, East China［J］. Geophysics, 2002, 67（4）: 1138-1147.

[4] 张凤旭. 高精度重力异常数据处理方法、技术研究：博士学位论文［D］. 长春：吉林大学，2006.
ZHANG Feng-xu. The study of method and technology for high resolution data processing of gravity anomalies: doctor's degree thesis［D］. Changchun: Jilin University, 2006.

[5] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法［M］. 北京：地质出版社，1997：204-209.
YANG Wen-cai. Inverse theories and methods of geophysical problems［M］. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 204-209.

[6] 黄宗理，郭佳. 二维位场在有源空间的解析延拓［J］. 地球物理学报，2016，59（2）：704-710.
HUANG Zong-li, GUO Jia. Analytical continuation of the two-dimensional potential field in an active space［J］. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59（2）: 704-710.

[7] 张凤旭，孟令顺，张凤琴，等. 波数域重力归一化总梯度法中的圆滑滤波因子［J］. 物探与化探，2005，29（3）：248-252.
ZHANG Feng-xu, MENG Ling-shun, ZHANG Feng-qin, et al. A study of smoothing filter operator for normalized full gradient of gravity anomaly in wave-number-domain［J］. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29（3）: 248-252.

[8] 张凤琴，张凤旭，刘财，等. 利用 DCT 法计算重力归一化总梯度［J］. 吉林大学学报（地球科学版），2007，37（4）：804-808.
ZHANG Feng-qin, ZHANG Feng-xu, LIU Cai, et al. Using OTC to calculate nomalized full gradient of gravity anomalies［J］. Journal of Jilin University（Earth Science Edition）, 2007, 37（4）: 804-808.

[9] 郭灿灿，张凤旭，王彦国，等. 基于泰勒级数迭代的重力归一化总体度［J］. 世界地质，2012，31（4）：824-830.
GUO Can-can, ZHANG Feng-xu, WANG Yan-guo, et al. Calculating normalized full gradient of gravity anomalies using Taylor series iteration［J］. Global Geology, 2012, 31（4）: 824-830.

[10] 张凤旭，孟令顺，张凤琴，等. 利用 Hilbert 变换计算重力归一化总梯度［J］. 地球物理学报，2005，48（3）：704-709.
ZHANG Feng-xu, MENG Ling-shun, ZHANG Feng-qin, et al. Calculating normalized full gradient of gravity anomaly using Hilbert transform［J］. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48（3）: 704-709.

[11] 曾华霖，李小孟，姚长利，等. 改进的重力归一化总梯度法及其在胜利油区油气藏探测中的应用效果［J］. 石油勘探与开发，1999，26（6）：1-6.
ZENG Hua-lin, LI Xiao-meng, YAO Chang-li, et al. The modified normalized full gradient of gravity anomalies and its application to Shengli oil-field, East China

[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26 (6): 1-6.

[12] Meyer F D. Filter techniques in gravity interpretation [J]. Geophysics, 1974, 17 (4): 187-201.

[13] 梁锦文. 位场向下延拓的正则化方法 [J]. 地球物理学报, 1989, 32 (5): 600-608.
LIANG Jin-wen. Downward continuation of regularization methods for potential fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1989, 32 (5): 600-608.

[14] 刘东甲, 洪天求, 贾志海, 等. 位场向下延拓的波数域迭代法及其收敛性 [J]. 地球物理学报, 2009, 52 (6): 1599-1605.
LIU Dong-jia, HONG Tian-qiu, JIA Zhi-hai. Wave number domain iteration method for downward continuation of potential fields and its convergence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52 (6): 1599-1605.

[15] 王彦国, 张凤旭, 王祝文, 等. 位场向下延拓的泰勒级数迭代法 [J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46 (4): 657-662.
WANG Yan-guo, ZHANG Feng-xu, WANG Zhu-wen, et al. Taylor series iteration for downward continuation of potential fields [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46 (4): 657-662.

[16] 王彦国, 王祝文, 张凤旭, 等. 位场向下延拓的导数迭代法 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2012, 42 (1): 240-245.
WANG Yan-guo, WANG Zhu-wen, ZHANG Feng-xu, et al. Derivative-iteration method for downward continuation of potential fields [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42 (1): 240-245.

[17] 王彦国. 高精度重力归一化总梯度法的研究及应用: 硕士学位论文 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
WANG Yan-guo. Study and application of high precision normalized full gradient of gravity anomaly method: master's degree thesis [D]. Changchun: Jilin University, 2010.