

doi: 10.11720/wtyht.2021.0396

文百红,胡庆辉,张连群.地质体形状对逐层优化正则化下延成像的影响研究[J].物探与化探,2021,45(6):1553-1558.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0396>

Wen B H, Hu Q H, Zhang L Q. Affect of configuration parameters of geobody on regularization downward continuation imaging by successive layer optimization[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(6): 1553-1558. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.0396>

# 地质体形状对逐层优化正则化下延成像的影响研究

文百红<sup>1</sup>, 胡庆辉<sup>2,3</sup>, 张连群<sup>1</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 山东省地质勘查开发局 第四地质大队, 山东 潍坊 261000; 3. 山东省地矿局 海岸带地质环境保护重点实验室, 山东 潍坊 261000)

**摘要:** 重磁位场逐层截频优化正则化下延成像技术可用于研究地质体的形态和物性分布特征。由于不同形状地质体可能有相似的重磁异常, 重磁位场下延存在多解性。通过对 4 种基本形体重磁位场波谱特征对比研究及对 35 组不同形体重力场下延成像参数优选, 获得地质体的综合形态参数与波谱形状校正系数的回归方程, 并构建了形态滤波因子。利用带形态滤波因子的逐层优化正则化下延成像可提高不同形状长方体中心深度的归位精度。结合地震构造特征和形态参数回归方程确定的形态滤波因子, 对川西枫顺场地区重力资料进行逐层优化下延成像, 与地震剖面及测井密度曲线整体特征基本一致, 证实了带形态滤波因子逐层优化正则化下延方法技术的可行性和有效性。

**关键词:** 形态滤波因子; 下延成像; 波谱分析; 重磁位场

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2021)06-1553-06

## 0 引言

重磁位场中包含地质体的形态和物性分布信息, 通过物性反演可以获得地质体的分布特征, 但存在明显的多解性<sup>[1]</sup>。重磁位场向下延拓可以增强地下深部构造和岩体的弱异常特征, 减少重磁异常解释的多解性<sup>[2]</sup>。由于重磁位场向下延拓不满足拉普拉斯方程, 即使下半空间无源, 向下延拓的解也发散。因此, 稳定的向下延拓方法技术一直是地球物理学家研究和关注的重点<sup>[3-13]</sup>。P. Naidu 等学者对不同深度随机分布物性的位场波谱特征进行了系统分析, 得出重磁异常的波谱特征与格林等效层的深度具有一种指数衰减特征<sup>[14-16]</sup>。

根据格林等效层原理, 在研究重磁位场逐层分离的基础上, 我们提出了一种逐层截频优化正则化下延成像<sup>[17-18]</sup>。该方法技术在四川盆地深层构造

识别和地质解释得到了初步的应用, 与地震解释剖面和钻井结果有良好的一致性<sup>[18]</sup>。

由于不同形态地质体可能有相似的重磁异常, 重磁位场下延成像也存在多解性。本文通过不同形体重磁位场波谱特征研究及模型试验分析, 建立了地质体的综合形态参数与其波谱形态校正系数的回归方程, 提出了由综合形态参数和波谱形态校正系数确定的形态滤波因子。对 35 组不同形态地质体的重磁位场的形态滤波后逐层优化正则化下延成像, 明显提高地质体中心深度的归位精度。在川西枫顺场的重磁位场下延成像结果证实了形态校正方法技术的可行性和有效性。

## 1 基本形状地质体重磁位场波谱特征

设定空间坐标  $x, y, z$  对应的波数分别为  $u, v, r = \sqrt{u^2 + v^2}$ , 地质体的顶部深度、中心深度和底部深度

收稿日期: 2021-02-09; 修回日期: 2021-08-09

基金项目: 国家重点研发计划项目“超深层重磁地震勘探技术研究”(2016YFC06011)

第一作者: 文百红(1963-), 男, 高级工程师, 地质矿物学博士, 毕业于俄罗斯圣彼得堡矿业学院, 从事地球物理和地球化学油气勘探方法技术综合研究工作。Email: wenbh@petrochina.com.cn

分别为  $h_1, h, h_2$ , 沿  $x$  和  $y$  方向的水平尺度为  $2a$  和  $2b$ 。根据重磁位场波谱原理<sup>[19]</sup>, 可得到 4 种基本形态(球体、垂直圆柱体、水平方块体和垂直棱柱体)的重力异常振幅谱表达式为:

$$\Delta G_{sp}(u, v) = 2\pi G m_{\sigma} e^{-rh}, \tag{1}$$

$$\Delta G_{vc}(u, v) = 2\pi G m_l \frac{1}{r} e^{-rh_1} [1 - e^{-r(h_2-h_1)}], \tag{2}$$

$$\Delta G_{hr}(u, v) = 2\pi G m_{\sigma} \left| \frac{\sin(ua)}{ua} \right| \times \left| \frac{\sin(vb)}{vb} \right| e^{-rh}, \tag{3}$$

$$\Delta G_{vr}(u, v) = 2\pi G m_l \frac{1}{r} \left| \frac{\sin(ua)}{ua} \right| \times \left| \frac{\sin(vb)}{vb} \right| e^{-rh_1} [1 - e^{-r(h_2-h_1)}], \tag{4}$$

其中:  $\Delta G_{sp}(u, v), \Delta G_{vc}(u, v), \Delta G_{hr}(u, v), \Delta G_{vr}(u, v)$  分别为球体、垂直圆柱体、水平方块体和垂直棱柱体相应的重力异常振幅谱,  $m_{\sigma}, m_l$  为地质体的剩余质量和垂向单位长度的剩余质量。  $m_{\sigma} = m_l(h_2-h_1)$ 。

图 1 展示了这 4 种形态地质体的中心剖面的振幅谱及包络面的基本特征。不同形态地质体对重力异常振幅谱的影响主要表现在指数衰减的形式和快慢特征上。水平方块体和垂直棱柱体的振幅谱包络特征与球体的振幅谱特征具有一定的相似性。球体振幅谱具有最严格的指数衰减形式; 由于厚度小于球体半径, 垂直圆柱体振幅谱略小于球体振幅谱; 由于  $x$  和  $y$  方向水平尺度的影响, 水平方块体和垂直棱柱体的振幅谱具有类似的周期变化特征, 但波谱包络面强度随波数增加而指数衰减。

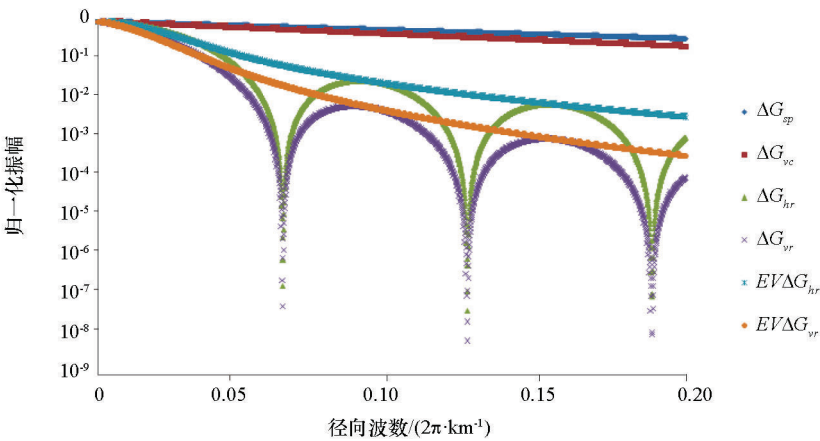


图 1 典型形体重力异常中心剖面振幅谱特征

Fig.1 Amplitude spectral characteristics of gravity anomalies for 4 typical geometrical configurations

由于  $\lim_{\substack{u \rightarrow 0 \\ v \rightarrow 0}} \left| \frac{\sin(ua)}{ua} \right| \times \left| \frac{\sin(vb)}{vb} \right| = 1$  和  $\lim_{\substack{u \rightarrow \infty \\ v \rightarrow \infty}} \left| \frac{\sin(ua)}{ua} \right| \times \left| \frac{\sin(vb)}{vb} \right| = 0$ , 水平尺度的影响类似于指数衰减函数。若取波谱函数的包络面, 则式(1)~(4)可转化统一的频谱包络函数, 即

$$EV\Delta G(u, v) = 2\pi G m_{\sigma} e^{-rh} (1 - P_0 e^{-rFP}), \tag{5}$$

其中:  $FP = \frac{4ab(h_2-h_1)}{h_1^2}$  为综合形态参数,  $P_0$  为形态校正系数, 并定义  $BH(u, v) = (1 - P_0 e^{-rFP})$  为形态滤波因子, 综合了深度、水平尺度和垂直延伸的波谱效应。

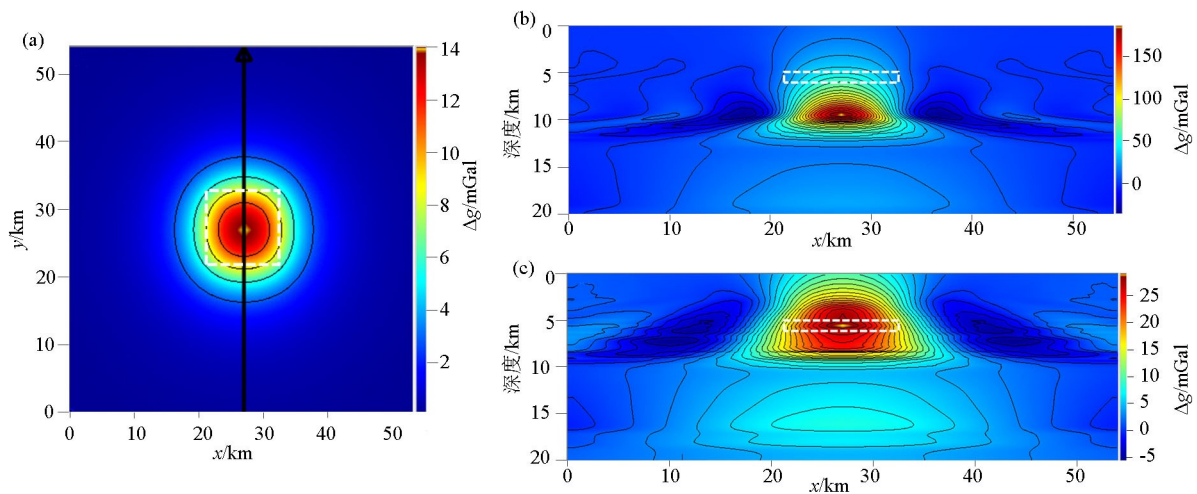
研究表明, 当  $P_0 \rightarrow 0$  时,  $EV\Delta G(u, v)$  趋于球体(点源)重力异常振幅谱特征; 当  $0 < P_0 < 0.25$  时,  $EV\Delta G(u, v)$  趋于等轴状体重力异常波谱特征; 当  $P_0 > 0.25$  时,  $EV\Delta G(u, v)$  趋于棱柱状体重力异常波谱特征。

图 2a 为顶部深度  $h_1 = 5.0$  km、厚度  $h_2 - h_1 = 1$  km, 宽度  $2a = 2b = 11$  km, 密度差为  $0.1 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> 的水平方块体的重力异常, 虚线白框为长方体薄板的边界位置。通过直接逐层优化下延成像(图 2b)和形态滤波后逐层优化下延成像(图 2c)的对比发现, 直接逐层下延异常中心位置与长方体薄板模型中心位置存在明显偏差(偏深); 经过形态参数( $FP = 4.84$  km,  $P_0 = 0.288$ )校正后的逐层下延异常中心位置与模型中心位置一致性很好; 15 km 以下弱异常为有效长度剖面的截频效应, 通过插值切割法<sup>[20]</sup>消除低频背景影响后可以改善下延成像效果。

对于地磁场也有类似的情况, 若考虑化到磁极的垂直磁场  $\Delta Z, M_z$  为地质体的总磁矩, 则不同形态的垂直磁场频谱包络函数可统一表示为

$$EV\Delta Z(u, v) = 2\pi M_z r e^{-rh} (1 - P_0 e^{-rFP}), \tag{6}$$

垂直磁场频谱包络函数具有自己相应的变化规律。



a—重力异常;b—直接下延成像剖面;c—形态滤波后下延成像剖面  
a—gravity anomaly; b—DCSLO image before configuration filtering; c—DCSLO image after configuration filtering

图2 长方体重力异常形态滤波前后逐层优化下延成像

Fig.2 Gravity DCSLO imaging of horizontal rectangular slab before and after configuration filtering

2 重磁波谱形状校正方法

通过对不同顶底深度及不同水平尺度的 35 个长方体重力异常的逐层优化正则化下延成像结果的反复试算对比,优选出成像中心深度和形态特征与模型参数相近的 35 组形态校正参数。图 3 为综合形态参数  $FP$  与形态校正系数  $P_0$  的交会图。通过回归分析得到相应的回归方程

$$P_0 = 0.052\ln(FP) + 0.206. \tag{7}$$

图 4 为计算得到综合形态参数  $FP$  和由回归方程得到的形态校正系数  $P_0$ ,对不同扁度  $E=2\sqrt{ab}/(h_2-h_1)$  和不同深度  $h_1$  的 9 组长方体模型重力异常的下延成像结果,虚线白框为长方体的边界位置。

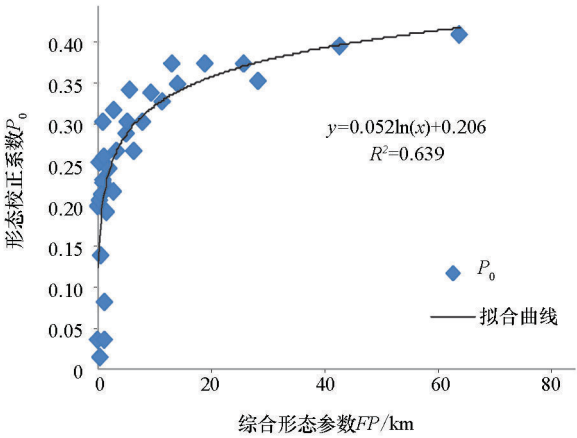


图3 形态参数回归分析

Fig.3 Regressive analysis of configuration parameters

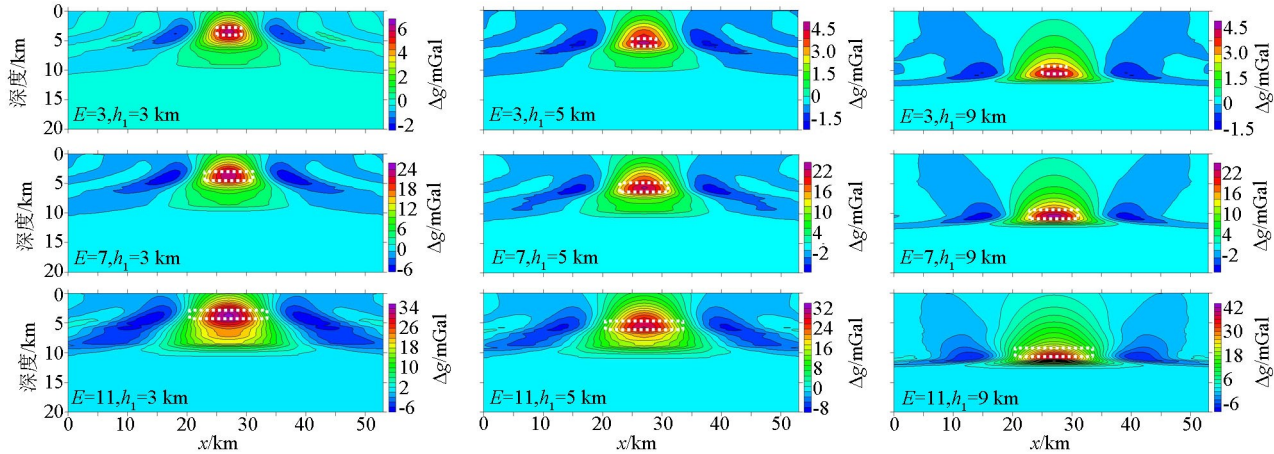


图4 不同形态水平长方体重力场下延成像

Fig.4 Gravity DCSLO imaging of horizontal rectangular slabs of different configuration

可见,成像中心深度和形态特征与模型参数特征基本吻合,通过插值切割处理<sup>[21]</sup>,低频背景影响已基本消除(对比图 2c)。

3 应用实例

为测试形态校正方法的适用性,选择了川西北山前构造带覆盖 16FSC02 号束线地震的重磁实测资料(图 5)开展重磁下延成像试验应用。

工区位于川西北剑阁与江油之间,区内交通便利。地形西北高、东南低,山地约占 90%,地表高程在 500~3 000 m 之间。植被覆盖率达 90% 以上,有白龙江、清水河等河流穿过。野外重磁测量质检均方误差分别为±0.04 mGal 和±1.2 nT,数据质量较好。

由于研究区内地形起伏严重,首先对原始重力数据进行“曲化平”处理,并通过波谱结构分析去除区域背景。对实测地磁异常也进行了进行“曲化平”处理和化到磁极,并计算磁源重力异常。

对预处理后的重磁数据进行逐层优化正则化下延得到重磁三维数据体,沿 16FSC02 号束线地震剖面进行了重磁剖面成像和地质解释。根据地震深度

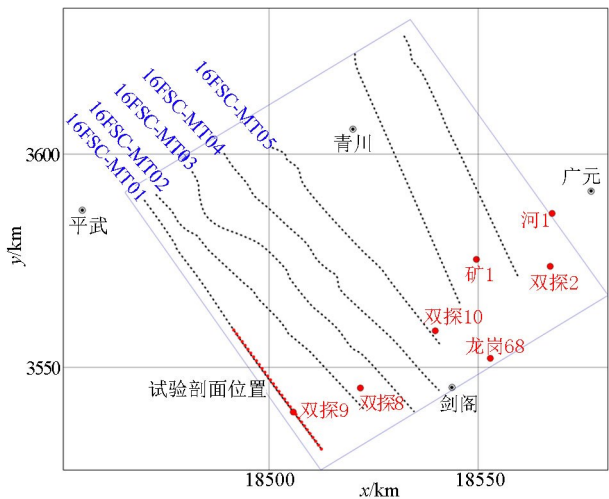
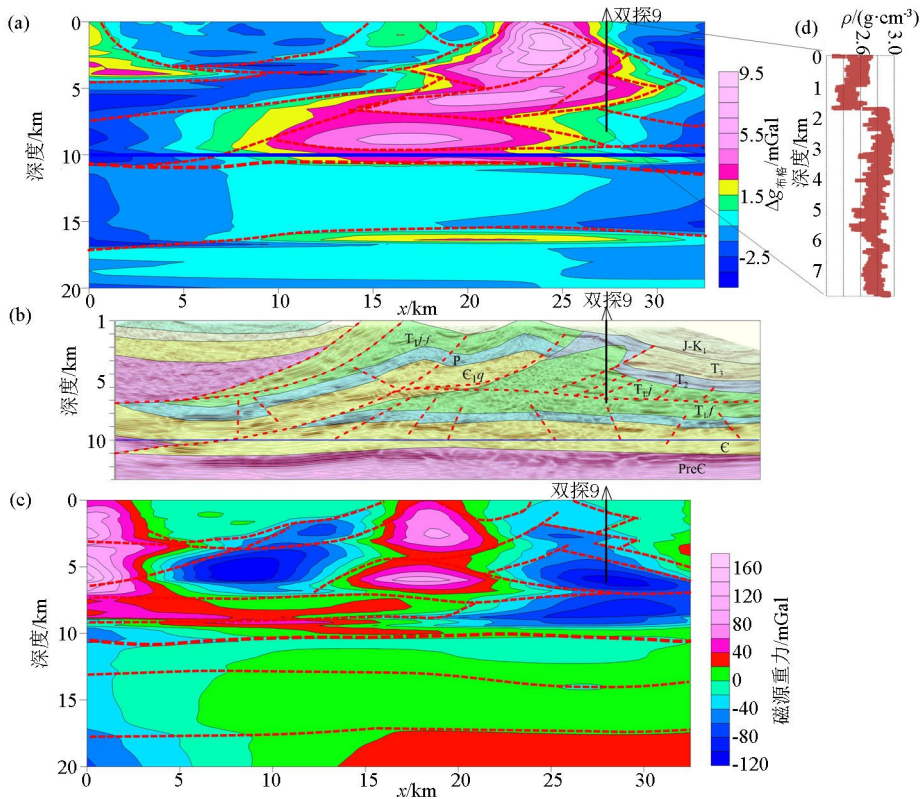


图 5 枫顺场地区重磁电勘部署示意  
Fig.5 Sketch of field work deployment in FengShunChang area in Western Sichuan

偏移剖面,估算引起重力异常的构造深度  $h_1=4$  km,宽度  $2\sqrt{ab}=15$  km 和中心厚度  $h_2-h_1=2$  km,综合形态参数  $FP=28.125$  km,由回归方程得到的形态校正系数  $P_0=0.380$ 。对研究区内重磁数据进行形态滤波后的逐层优化正则化下延成像,并根据多期滑脱推覆构造模式,对重磁下延成像结果进行了初步地层、断层和构造解释(图 6a、c)。



a—重力成像剖面; b—地震解释剖面; c—磁场成像剖面; d—密度测井曲线; e—剖面位置  
a—gravity imaging section; b—seismic interpretation section; c—magnetic imaging section; d—density logging data; e—profile orientation map

图 6 形态滤波后重磁下延成像与地质解释

Fig.6 Gravity and magnetic DCSLO imaging after configuration filtering and geological interpretation

对比图 6b 可见,在 0~11 km 下延成像重磁异常与地震构造形态及地层断裂分布特征具有良好的一致性。尽管下延重磁异常特征存在一定的差异,但在 11 km 左右的前寒武纪基底顶部构造形态上基本对应,在 17 km 左右均有明显的异常特征变化,对应前寒武系内构造层,值得关注和进一步研究。对比图 6d 可见,下延重力异常与密度测井曲线高低基本一致,说明下延重力异常值大小在一定程度上反映了地质体的密度变化特征。因此,形态校正后的重磁下延成像结果可作为大套地层层位和区域构造界限划分的参考依据,这为深层构造地质研究提供了新的地球物理技术支持。

4 结论

通过 4 种基本形体重力场波谱特征对比和 35 个模型试算分析,建立了综合形态参数  $FP$  与波谱形态校正系数  $P_0$  的回归方程,定义了形态滤波因子  $BH(u,v)$ ,提出了针对不同形状地质体的形态校正方法技术;利用地震构造确定综合形态参数  $FP$ ,由回归方程确定形态校正系数  $P_0$ ,构建形态滤波因子  $BH(u,v)$ ,开展带形态滤波因子的逐层截频优化正则化下延成像。通过对川西北 16FSC02 号束线地震剖面的重磁实测资料下延成像试验应用,初步证实了上述形状校正方法技术的可行性和有效性,为复杂构造区的重磁下延成像提供了新的技术手段。

**致谢** 本文得到了国家重点研发计划课题“超深层重磁电弱信号高精度采集处理技术”(2016YFC0601102)和“重磁电震约束与联合反演技术”(2016YFC0601104)的联合资助。

参考文献 (References):

[1] 曾华霖.重力场与重力勘探[M].北京:地质出版社,2005.  
Zeng H L. Gravity field and gravity prospecting [M]. Beijing: Geological Publishing Press, 2005.

[2] Fedi M, Pilkington M. Understanding imaging methods for potential field data [J]. Geophysics, 2012, 77(1): G13–G24.

[3] 栾文贵.位场解析延拓的稳定化算法[J].地球物理学报,1983, 26(3):263–274.  
Luan W G. The stablized algorithm of the analytic continuation for the potential field [J]. Acta Geophysica Sinica, 1983, 26(3): 263–274.

[4] Berezkin V M. Method of the total gradient in geophysical prospecting [M]. Moscow: Nedra, 1988 (in Russian).

[5] 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 J W. Downward continuation of regularization methods for

potential fields [J]. Acta Geophysica Sinica, 1989, 32(5): 600–608.

[6] 王邦华,王理.重磁位场的正则化向下延拓[J].物探化探计算技术,1998,20(2):30–35.  
Wang B H, Wang L. A new normalized method of downward extrapolation for potential field [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 20(1): 30–35.

[7] Fedi M, Florio G. A stable downward continuation by using the IS-VD method [J]. Geophysical Journal International, 2002, 151: 146–156.

[8] Cooper G. The stable downward continuation of potential field data [J]. Exploration Geophysics, 2004, 35, 260–265.

[9] 徐世浙.位场延拓的积分—迭代法[J].地球物理学报,2006,49 (4):1176–1182.  
Xu S Z. The integral iteration method for continuation of potential fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1176–1182.

[10] 曾小牛,李夕海,韩绍卿,等.位场向下延拓三种迭代方法之比较[J].地球物理学进展,2011,26(3):908–915.  
Zeng X N, Li X B, Han S Q, et al. A comparison of three iteration methods for downward continuation of potential fields [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 908–915.

[11] Zeng X N, Li X H, Su J, et al. An adaptive iterative method for downward continuation of potential-field data from a horizontal plane [J]. Gephysics, 2013, 78(4): J43–J52.

[12] 刘晓刚,王兴涛,李迎春,等.重力与磁力测量数据向下延拓中最优正则化参数确定方法研究[J].测绘学报,2014,43(9): 881–887.  
Liu X G, Wang X T, Li Y C, et al. Optimal regularization parameter determination method in downward continuation of gravimetric and geomagnetic data [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(9): 881–887.

[13] 李晓杰,王真理.正则化等效层重力向下延拓方法[J].地球物理学报,2018,61(7):3038–3036.  
Li X J, Wang Z L. A study on gravity field downward continuation using the regularized equivalent-layer method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(7): 3038–3036.

[14] Naidu P. Spectrum of the potential field due to randomly distributed sources [J]. Geophysics, 1968, 33: 337–345.

[15] Pawlowski R S. Green’s equivalent-layer concept in gravity band-pass filter design [J]. Geophysics, 1994, 59: 69–76.

[16] Quarta T, Fedi M, Santis A. Source ambiguity from an estimation of the scaling exponent of potential field power spectra [J]. Geophys. J. Int., 2000, 140: 311–323.

[17] 王纯,张研,文百红.改进的重力场向下延拓计算方法[J].大庆石油地质与开发,2018,37(1):147–153.  
Wang C, Zhang Y, Wen B H. The improved calculating method of downward continuation for gravity potential field [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(1): 147–153.

[18] 文百红,杨辉,张连群,等.重磁优化下延成像深部物性结构预测[C]//中国地球科学联合学术年会 2020:6048–6051.  
Wen B H, Yang H, Zhang L Q. Deep physical structure prediction

by gravity and magnetic optimized downward continuation imaging [C]// Collection of Chinese earth science integrated symposium; 6048-6051.

[19] 程方道, 黄国强. 重磁位场波谱理论及其应用 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1987.

Cheng F D, Huang G Q. Spectral theory and its application of gravity and magnetic potential fields [M]. Changsha: Publishing Press of Central South University of Technology, 1987.

[20] 文百红, 程方道. 用于划分磁异常的新方法——插值切割法 [J]. 中南矿冶学院学报, 1990, 21(3): 229-235.

Wen B H, Cheng F D. A new interpolating cut method for identifying regional and local fields of magnetic anomaly [J]. Journal of Central South Mining and Metallurgy, 1990, 21(3): 229-235.

[21] 赵文举, 赵荔, 杨战军, 等. 插值切割位场分离方法改进及其在资料处理中的应用 [J]. 物探与化探, 2020, 44(4): 886-893.

Zhao W J, Zhao L, Yang Z J, et al. The improvement of the interpolation cutting potential field separation method and its application to data processing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 886-893.

Affect of configuration parameters of geobody on regularization downward continuation imaging by successive layer optimization

WEN Bai-Hong<sup>1</sup>, HU Qing-Hui<sup>2,3</sup>, ZHANG Lian-Qun<sup>1</sup>

(1. PetroChina Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. No.4 Geological Team of Shandong Bureau of Geology and Mineral Resources, Weifang 261000, China; 3. Key Laboratory of Coastal Zone Geological Environment Protection, Shandong Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Weifang 261000, China)

**Abstract:** Regularization downward continuation imaging by successive layer optimization (DCSLO) can be used to study the geometrical configuration and physical distribution of geological body (geobody). Due to possible similar features of potential fields for some bodies of different geometrical configurations, the downward continuation imaging is of no-uniqueness. From spectral study of 4 basic configurations of geological bodies and parameter selection for optimum downward continuation for the 35 gravity models of different configurations, a regressive formulas between configuration parameter and shape correction coefficient is obtained and consequently a configuration filter operator is proposed. With the configuration filter operator the DCSLO will enhance the imaging accuracy of geometrical center of complex geobody. A field example of DCSLO for gravity and magnetic data in FengSunChang area in Western Sichuan is given. With the configuration filter operator determined by the seismic structures and the regressive formulas, the DCSLO imaging is consistent with the main geometrical characteristics of the seismic deep structures and overall density logging data. This verified the applicability and effectiveness of the configuration filtering in DCSLO imaging.

**Key words:** configuration filter operator; downward continuation imaging; spectral analysis; gravity and magnetic potential fields

( 本文编辑: 王萌 )