

杜威, 董金生, 陈祥忠等. 2022. 基于改进 Parker-Oldenburg 界面反演方法计算青海省居里面深度. 地球物理学报, 65(3): 1096-1106, doi:10.6038/cjg2022P0150.

Du W, Dong J S, Chen X Z, et al. 2022. Calculation of Curie depth in Qinghai Province based on an improved Parker-Oldenburg interface inversion method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(3): 1096-1106, doi:10.6038/cjg2022P0150.

基于改进 Parker-Oldenburg 界面反演方法 计算青海省居里面深度

杜威¹, 董金生², 陈祥忠^{3*}, 张阳阳⁴, 刘俊成⁵, 惠梦琳⁶

1 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点研究实验室, 贵阳 550081

2 潍坊市经济学校, 潍坊 262200

3 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255000

4 安徽省勘查技术院, 合肥 230031

5 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

6 北京桔灯地球物理勘探股份有限公司, 北京 102200

摘要 居里面深度的起伏可以大致反映地壳深部温度场的分布特征, 从而间接指示干热岩的赋存情况, 因此研究居里面的起伏特征十分重要. 本文针对经典的 Parker-Oldenburg 界面反演方法存在的计算不稳定、结果精度低的问题, 通过公式推导, 将界面反演公式与向下延拓公式进行类比, 利用稳定的波数域正则-积分迭代下延法对经典的 Parker-Oldenburg 界面反演方法进行改进. 这种迭代算法不仅有效地解决了反演迭代过程中的发散问题, 而且对噪声也有很好的压制效果. 模型试验说明了该方法在磁界面反演中的良好效果, 最后利用青海省航磁数据对进行了居里面深度反演, 反演结果可以看出青海省居里面表现为隆起和凹陷相间的条带状或块状构造, 初步预测了青海省可能存在干热岩的两个地区, 为今后地热资源的勘探、开发和利用提供参考.

关键词 居里深度; 正则积分迭代; Parker-Oldenburg 界面反演法; 青海省

doi:10.6038/cjg2022P0150

中图分类号 P631

收稿日期 2021-03-03, 2021-11-22 收修定稿

Calculation of Curie depth in Qinghai Province based on an improved Parker-Oldenburg interface inversion method

DU Wei¹, DONG JinSheng², CHEN XiangZhong^{3*}, ZHANG YangYang⁴,
LIU JunCheng⁵, HUI MengLin⁶

1 *The State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China*

2 *Weifang Economic School, Weifang 262200, China*

3 *The School of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China*

4 *Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Hefei 230031, China*

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

6 *Beijing Orangelamp Geophysical Exploration Company Limited, Beijing 102200, China*

Abstract The shape of Curie depth can roughly reflect the distribution characteristics of the temperature field in the deep crust, and indirectly reflect the existence of hot and dry rocks. So, it is very important to study Curie depth. In this paper, based on aeromagnetic anomaly data,

基金项目 国家青年科学基金项目(41904129)资助.

第一作者简介 杜威, 女, 1990 年生, 博士后, 主要从事重磁场数据处理及解释方面的研究. E-mail: duwei0505@yeah.net

* 通讯作者 陈祥忠, 男, 1982 年生, 教授, 主要从事物探综合处理方法技术的研究. E-mail: 6447316@163.com

through formula derivation, the interface inversion formula is compared with the downward continuation formula, and the classical Parker-Oldenburg interface inversion method is improved by using the stable wave number domain regularization integral iterative downward continuation method. This iterative algorithm not only effectively solves the divergence problem in the iterative process of inversion, but also has a good suppression effect on noise. The good application of this method in magnetic interface inversion is illustrated by model test. Finally, the inversion of Curie depth in Qinghai Province is carried out by using aeromagnetic data and the Curie depth of Qinghai Province shows the strip or block structures of uplift and depression. Two areas where dry hot rock may exist in Qinghai Province are preliminarily predicted, which provides a reference for the exploration, development and utilization of geothermal resources in the future.

Keywords Curie depth; Regular-integral iteration; Parker-Oldenburg interface inversion method; Qinghai Province

0 引言

了解磁性界面的几何结构是地球物理反演中的经典问题之一,居里等温面作为地下一个著名的磁性界面,同时也是个温度界面。另外,居里等温面实际上是磁测的最大勘探深度,从磁测中获得的地磁异常可以用来研究居里点深度以上的磁结构,通过居里面的结构特征,可以间接反映出岩石圈的热活动状态 (Shuey et al., 1977; Ross et al., 2006; Aydin and Oksum, 2010; Obande et al., 2014; 刘隆等, 2021)。

居里面深度计算已经被世界上许多学者研究过 (Tselentis, 1991; Aboud et al., 2011; El Nabi, 2012), 其计算方法包括谱分析法和界面反演法。Spector 和 Grant (1970) 提出了一种计算磁源深度的对数方法, 利用磁数据的功率谱分析来估计居里深度 (Blakely, 1995; Ruiz and Introcaso, 2004)。自此, 一系列的谱分析法被提出 (Afshar et al., 2017; Hsieh et al., 2014; Khojamli et al., 2017; Li et al., 2010; Ravat et al., 2007; Ruiz and Introcaso, 2004)。Parker (1973) 在位场界面的正演计算中引入了快速傅立叶变换 (FFT)。根据该公式, Oldenburg (1974) 提出了一种频域深度界面迭代反演方法, 改变了以往采用棱柱体或长方体模型反演界面深度不连续的做法, 同时提高了计算速度 (Gómez-Ortiz and Agarwal, 2005)。由于居里深度通常被认为是磁化体在地壳中的底部深度 (Aydin et al., 2005; Li et al., 2010), 因此 Parker-Oldenburg 界面反演方法也经常被用来反演居里面深度。王德华等 (2018) 用 Parker-Oldenburg 界面反演方法反演了江苏郯庐断裂带及其邻区的居里面深度。结果表明, 郯庐断裂位于居里凹陷区, 是一个热流值低、

地温梯度低的地区。刘卓等 (2019) 也用这种方法反演了松辽盆地的居里深度, 其深度介于 18~25 km 之间。周稳生等 (2014) 研究了三江盆地的居里深度, 得出了其居里面深度北浅南深的结论。田甜等 (2017) 比较了中国延边的居里深度和莫霍面深度。屈念念等 (2019) 用这种方法反演了贵州省的居里深度。

然而, 虽然利用经典的 Parker-Oldenburg 算法可以反演居里面的几何结构, 但是由于经典的 Parker-Oldenburg 方法存在类似于于 Fourier 域中的向下延拓因子的发散项, 使反演结果不易收敛, 所获得的居里面起伏结果往往也存在较大误差。为了获得较为精确的结果, 大多数作者 (Oldenburg, 1974; Granser, 1986; Reamer and Ferguson, 1989; Guspi, 1993; Pilkington, 2006) 在迭代过程中应用了滤波, 切断高频分量。曾小牛等 (2013) 提出了一种频率域正则积分迭代的向下延拓方法, 其下延结果稳定收敛快, 进而界面反演的计算结果也有很好的精度。本文在 Parker-Oldenburg 反演算法的基础上, 利用正则积分迭代法推导了改进的界面反演公式, 该方法在加快迭代收敛的同时, 能够压制噪声。另外, 同谱分析法相比, 省去了繁琐的计算。

1 方法原理

1.1 Parker-Oldenburg 界面反演法和位场向下延拓的波数域正则积分迭代法

Parker (1973) 给出了地下不规则界面引起的磁异常的计算公式, 公式为:

$$F[\Delta T] = 2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_l \cdot e^{-z_0 k} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} F[h^n], \quad (1)$$

其中 $F[\Delta T]$ 是总磁场的傅里叶变换, M 是磁化强度, C_m 是磁导率, $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ 是波数, 其中 k_x 和 k_y 是沿 x 和 y 方向的波数, z_0 是距观测面面垂直距离的平均深度, $F[h^n]$ 是平均深度 z_0 的界面变化(向下为正), Θ_m 和 Θ_f 分别是磁化场与地磁场的磁化因子:

$$\Theta_m = \hat{m}_z + i \frac{\hat{m}_x k_x + \hat{m}_y k_y}{|k|},$$

$$\Theta_f = \hat{f}_z + i \frac{\hat{f}_x k_x + \hat{f}_y k_y}{|k|},$$

其中 $\hat{m} = (\hat{m}_x, \hat{m}_y, \hat{m}_z)$ 和 $\hat{f} = (\hat{f}_x, \hat{f}_y, \hat{f}_z)$ 分别是磁化方向和地磁场方向的方向余弦 (Blakely, 1995; Pham et al., 2018). 将公式(1)中 $n=1$ 项移到左边, 整理得:

$$F[h^n] = -\frac{F[\Delta T] e^{\varepsilon_0 k}}{2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_f} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^{n-1}}{n!} F[h^n]. \quad (2)$$

式(2)就是 Parker-Oldenburg 界面迭代反演计算公式, 其反演过程为:

(1) 首先忽略掉公式(2)右端的求和项, 将实测磁异常进行傅里叶变换得到 $F[\Delta T]$, 代入公式中, 进行傅里叶反变换求得起伏深度 Δh 的初始值 Δh_0 , 即: $\Delta h_0 = F^{-1} \left[\frac{-e^{\varepsilon_0 k} F(\Delta T)}{2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_f} \right]$.

(2) 将初始深度值带到正演公式(1)中, 得到正演初始波谱 $F(\Delta T)_0$, 与第一步中的实测磁异常的波谱 $F[\Delta T]$ 作差, 得到一阶波谱差 $\Delta \partial T_1 = F(\Delta T) - F(\Delta T)_0$.

(3) 将一阶波谱差带到反演公式(2)中, 按照步骤(1)计算 Δh 的一阶残差值, 即:

$$\Delta \partial h_1 = F^{-1} \left[\frac{-e^{\varepsilon_0 k} \Delta \partial T_1}{2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_f} \right],$$

(4) 令 $\Delta h_1 = \Delta h_0 + \Delta \partial h_1$ 为起伏深度 Δh 的一阶近似值, 再按照步骤(2)和步骤(3)分别求出的 2 阶波谱差和 $\Delta \partial h_2$ 的二阶残差值 $\Delta \partial h_2$, 重复步骤(2)、(3), 即可求得 Δh 的 n 阶近似值 $\Delta h_n = \Delta h_0 + \sum_{i=1}^n \Delta \partial h_i$, 直到满足 n 阶波谱差 $\Delta \partial T_n$ 小于指定的迭代截止常数 ε 或者迭代达到指定的迭代次数为止, 其中 ε 为较小的正数.

曾小牛等(2013)提出了一种波数域正则积分迭代法, 用于计算位场的向下延拓, 提高了算法的精度、稳定性和收敛速度. 向下延拓波数域正则积分迭代法的表达式为:

$$\begin{cases} U_A^{(1)} = R_\alpha U_B, \\ U_A^{(m+1)} = U_A^{(m)} + R_\alpha (U_B - \Phi U_A^{(m)}), \end{cases} \quad (3)$$

其中 U_B 和 U_A 表示观测面位场数据(重力或磁场数据)和向下延拓场的傅里叶变换, $U_A^{(m)}$ 是向下延拓位场第 m 次迭代的傅里叶变换, m 是迭代次数, $\Phi = e^{-kh}$ 是向上连续因子, h 是向下延拓的深度, $R_\alpha = \frac{\Phi}{\Phi^2 + \alpha}$ 是正则化算子, 其中 α 是正则参数.

根据上述公式, 可知:

$$\begin{aligned} U_A^{(m+1)} &= U_A^{(m)} + R_\alpha (U_B - \Phi U_A^{(m)}) \\ &= (1 - R_\alpha \Phi) U_A^{(m)} + U_A^{(1)} \\ &= [(1 - R_\alpha \Phi)^m + (1 - R_\alpha \Phi)^{m-1} + \dots \\ &\quad + (1 - R_\alpha \Phi) + 1] U_A^{(1)} \\ &= \frac{1 - (1 - R_\alpha \Phi)^{m+1}}{R_\alpha \Phi} U_A^{(1)}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $(1 - R_\alpha \Phi) < 1$, $U_A = \lim_{m \rightarrow \infty} U_A^{(m+1)} = [1/(R_\alpha \Phi)] U_A^{(1)} = \Phi^{-1} U_B$, 当迭代次数为 $m \rightarrow \infty$ 时, 迭代结果收敛.

1.2 改进方法的推导

从 1.1 节的迭代过程可以看出, 波数域 Parker-Oldenburg 反演公式的核心算子是向下延拓因子. 它的高通滤波特性会使反演收敛发散. 为了解决这个问题, 需要串联一个低通滤波器来消除高频的影响. 但是, 如果低通滤波因子选取不当, 会导致反演收敛缓慢或不完全, 低频信息也可能被抑制, 导致反演界面过于光滑, 影响界面反演结果的精度. 曾小牛等(2013)提出的向下延拓方法具有较高的稳定性和收敛速度. 因此, 以向下延拓因子为核心算子的 Parker-Oldenburg 界面反演方法可以与向下延拓方法进行比较. 下面是推导和证明.

公式(1)为 Parker-Oldenburg 正演公式, 与频率域向上延拓公式(即距观测面垂直距离 $h(h > 0)$ 处的磁场)进行比较. Parker-Oldenburg 公式可写为:

$$F[\Delta T] = F[2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_f \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n] e^{-\varepsilon_0 k}, \quad (5)$$

移项可得:

$$F[\Delta T] \cdot e^{\varepsilon_0 k} = F[2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_f \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n]. \quad (6)$$

公式(6)类似于波数域向下延拓公式 ($F(\Delta T_{\text{down}}) = F(\Delta T_0) e^{\varepsilon_0 k}$), 作如下类比:

$$\begin{cases} 2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_f \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n \sim \Delta T_{\text{down}}, \\ \Delta T \sim \Delta T_0, \end{cases} \quad (7)$$

类比向下延拓方程(4)可得:

$$\begin{cases} F\left(2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n\right)^{(1)} = R_a F(\Delta T), \\ F\left(2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n\right)^{(m+1)} = F\left(2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n\right)^{(m)} \\ + R_a \left[F(\Delta T) - \Phi F\left(2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n\right)^{(m)} \right]. \end{cases} \quad (8)$$

当 $F(\Delta T) - \Phi F\left(2\pi M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-k)^n}{n!} h^n\right)^{(m)}$ 小于指定的迭代截止常数 ϵ 或迭代次数 m 达到指定的迭代次数时,迭代停止. 忽略公式(8)中 n 大于或等于 2 的项,根据公式(4)可得:

$$\begin{cases} F(-2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot h)^{(1)} = R_a F(\Delta T), \\ F(-2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot h)^{(m+1)} = F(-2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot h)^{(m)} \\ + R_a [F(\Delta T) - \Phi F(-2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i \cdot h)^{(m)}] = \Phi^{-1} [1 - (1 - R_a \Phi)^{m+1}] F(\Delta T), \end{cases} \quad (9)$$

那么磁界面反演公式为:

$$h^{(m+1)} = \frac{-1}{2\pi k M \cdot C_m \cdot \Theta_m \cdot \Theta_i} F^{-1} \{ \Phi^{-1} [1 - (1 - R_a \Phi)^{m+1}] F(\Delta T) \}. \quad (10)$$

对于正则参数的选取,可采用 L 曲线及其曲率函数法来计算 (Hansen, 1992; Hansen and O'Leary, 1993; Regińska, 1996).

此产生的磁异常如图 1b 所示,利用 L 曲线计算出的正则参数为 9.5477×10^{-5} ,见图 2. 将 α 代入式(10),迭代 8 次后,界面反演深度如图 3 所示. 表 1 是这些方法的反演结果.

2 模型试验

图 1a 是平均深度为 2 km、磁倾角为 90° 、磁偏角为 0° 的磁界面模型的平面图,包括一个凹陷和两个凸起,网格间距为 0.5 km,界面上方的磁化强度为 $1.0 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$. 两个凸起(图 1a 中 A 和 B)的深度分别为 1.8299 km 和 1.7992 km,坐标分别为 (21 km, 35 km) 和 (35 km, 25.5 km),凹陷(图 1 中 C 位置)深度为 2.0774 km,坐标为 (19 km, 14 km). 由

对比图 3 的反演结果可以看出, Parker-Oldenburg 法和本文提出的方法均能反演界面的大致深度,后者反演的形态与真实界面形态更相似. 对比表 1 可以看出,两种方法计算出最浅位置的坐标均与真实位置坐标相同,但是本文反演的凸起点 A 最小深度与界面的真实深度较 Parker-Oldenburg 法反演出的结果更为接近理论值;对于模型中最浅的凸起点 B,本文改进方法计算的坐标位置 (35 km, 25.5 km) 与真实模型界面位置相同,而 Parker-Oldenburg 法

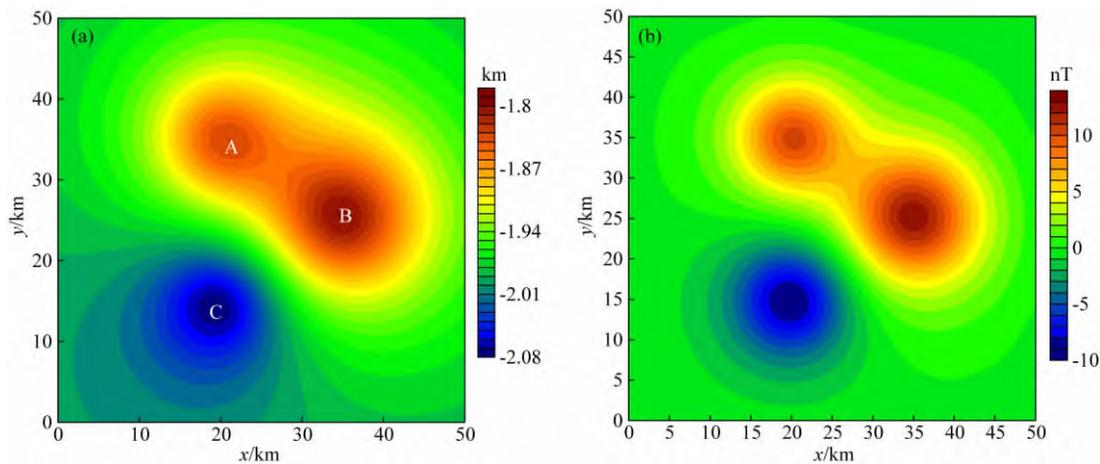


图 1 模型位置及其产生的磁异常图

(a) 模型深度起伏图; (b) 磁异常图.

Fig. 1 The position of the model and the magnetic anomaly map of it

(a) The depth fluctuation of the model; (b) The magnetic anomaly.

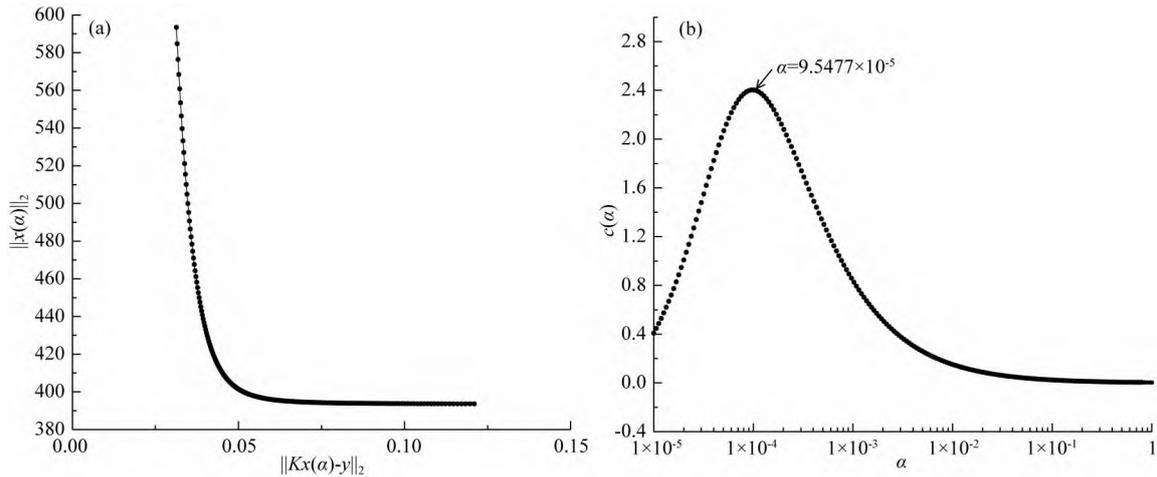


图 2 正则参数的计算

(a) L 曲线法; (b) L 曲线的曲率.

Fig. 2 The calculation of regular parameter

(a) L curve; (b) The curvature of L curve.

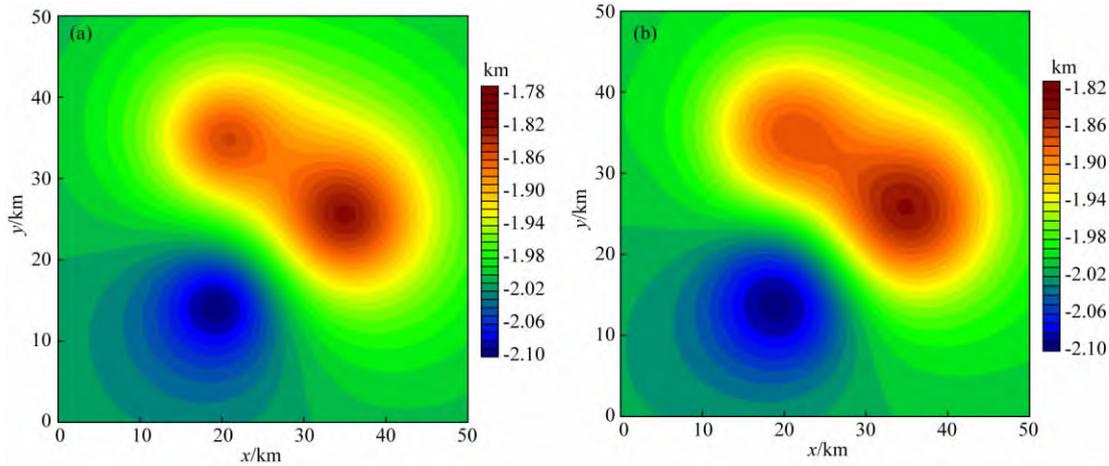


图 3 界面反演结果

(a) 改进后的方法; (b) 经典 Parker-Oldenburg 法.

Fig. 3 The interface inversion results

(a) The method in this paper; (b) The classical Parker-Oldenburg method.

表 1 图 1 模型的反演结果

Table 1 The statistics of inversion results of the model in Fig. 1

	位置 A		位置 B		位置 C		均方根误差 /km
	坐标/km	深度/km	坐标/km	深度/km	坐标/km	深度/km	
模型	(21,35)	1.830	(35,25.5)	1.799	(19,14)	2.077	—
Parker-Oldenburg	(22,35)	1.870	(35.5,26.5)	1.838	(19,14)	2.095	0.029
改进方法	(21,35)	1.838	(35,25.5)	1.817	(19,14)	2.086	0.011

计算的位置坐标为 (35.5 km, 26.5 km), 与真实位置 (35 km, 25.5 km) 在平面上存在 1.581 km 的误差, 且本文方法计算结果为 1.817 km, 较 Parker-Oldenburg 法计算的 1.838 km 更接近凸起点 B 的真实深度; 对于凹陷 C, 虽然两种方法对应的最大深

度位置均与真是界面的最大深度位置相同, 但是, Parker-Oldenburg 法计算结果为 2.095 km, 本文为 2.086 km 更接近真实深度 2.077 km. 因此, 可以认为本文提出改进的 Parker-Oldenburg 法的反演结果较经典 Parker-Oldenburg 反演方法计算结果更

接近真实起伏界面的深度。

鉴于实测数据中均包含有一定的噪声,因此在以上模型界面产生的磁异常中加入平均值为 0 nT,标准差为 0.1 nT 的高斯白噪声,其磁异常见图 4。

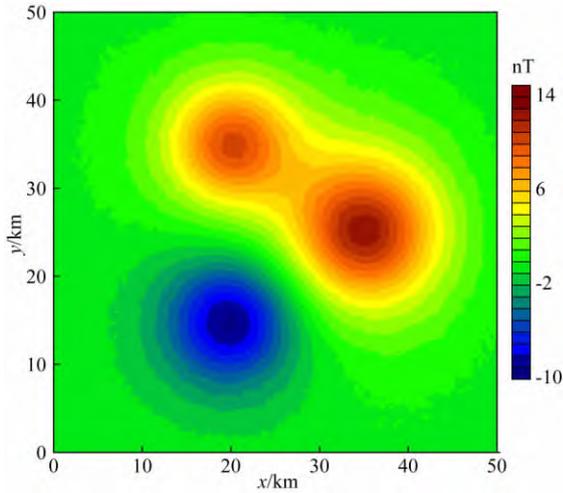


图 4 模型添加噪声后的磁异常

Fig. 4 The magnetic anomaly of the model after adding noise

图 5 是根据 L 曲线计算出来的正则参数,迭代 10 次后计算结果见图 6a,图 6b 是经典 Parker-Oldenburg 反演方法计算结果。表 2 是添加噪声情况后反演结果的对比。

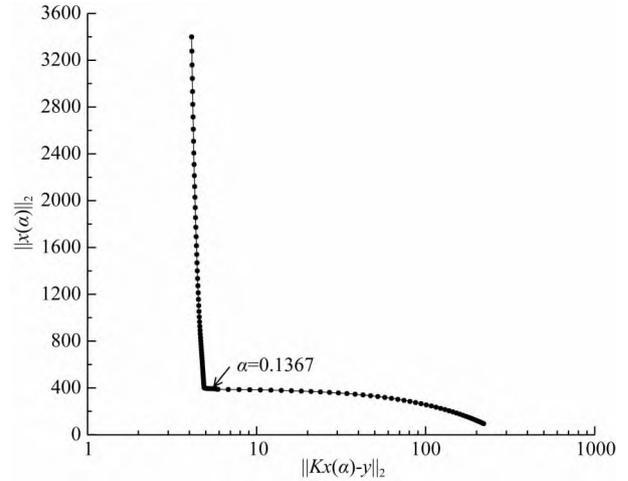


图 5 计算的 L 曲线图

Fig. 5 Calculated L curve

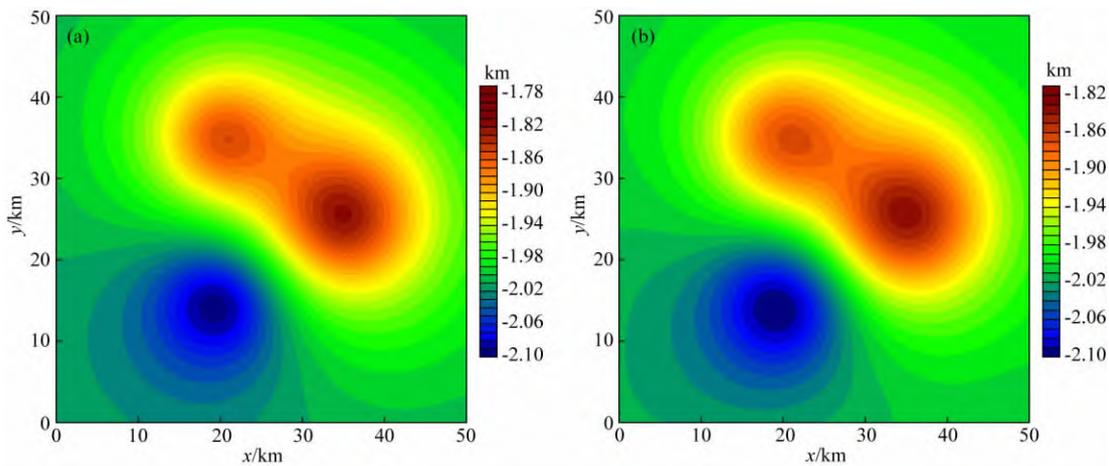


图 6 含噪声数据反演结果

(a) 改进后的方法; (b) 经典 Parker-Oldenburg 法。

Fig. 6 The depth inversion of the magnetic anomaly with noise

(a) The method in this paper; (b) The classical Parker-Oldenburg method.

表 2 图 5 模型的反演结果

Table 2 The statistics of inversion results of the model in Fig. 5

	位置 A		位置 B		位置 C		均方根误差 /km
	坐标/km	深度/km	坐标/km	深度/km	坐标/km	深度/km	
模型	(21,35)	1.830	(35,25.5)	1.799	(19,14)	2.077	—
Parker-Oldenburg	(22,35)	1.865	(35.5,26.5)	1.834	(19.5,14.5)	2.100	0.034
改进方法	(21,35)	1.850	(35,25.5)	1.816	(19,14)	2.096	0.021

从表中可以看出,两种方法同样能够反映出模型的大致形态,且对噪声的压制作用都比较好。对于

界面中的最深与最浅处,改进的 Parker-Oldenburg 迭代反演方法计算结果都更加接近模型的真实深

度,且位置与真实模型相同,且总体的均方根误差为 0.021 km 小于经典 Parker-Oldenburg 反演方法计算的均方根误差 0.029 km.

通过理论模型试验可以初步认为,基于波域正则-积分迭代下延法改进的 Parker-Oldenburg 方法能够保持界面的真实形状,且具有较强的抗噪声能力,可以应用于实际资料处理.

3 实际数据处理

青海省作为青藏高原的重要组成部分,位于青藏高原北部,是世界上地质构造最复杂、隆升最快的地区之一.高原隆起期间的强烈挤压产生了一系列褶皱和断层构造(Xiong et al., 2009; 薛光琦等, 2003),同时导致该地区活动断层的强烈分布(周保等, 2009).图 7 为青海省构造分布图(雷玉德等, 2017),从图中可以看出,受来自南侧方向地质体的挤压,青海省大部分断裂构造走向呈北西西向.

青海省总磁异常数据来源于地磁异常数据库 EMAG2v3. EMAG2v3 是根据 60 多年来卫星、船舶

和航空磁测数据整合编译而成的.图 8 为化极后青海省航磁异常等值线图,航磁异常幅度范围为 -270~470 nT.由南向北,全省正、负磁异常交替出现.青海省西南部和中北部存在明显的正异常圈闭,正异常圈闭分布较为复杂.磁异常总体形态与构造分布一致.

利用航磁数据对青海省居里面进行反演,首先从化极异常中提取出反映居里面的目标异常,再利用本文所提方法反演居里面深度,其中居里面平均深度根据全国计算结果、地温平均梯度值等综合考虑取 28 km(熊盛青等, 2016),迭代 8 次后,其反演结果见图 9.

从青海省居里深度图(图 9)可以看出,青海省居里深度大于 20 km,相对起伏范围为 2~6 km.构造形态西高东低,深度在 24.6~30.6 km 之间.最浅区域位于格拉丹东北部,深度约 24.6 km,最深区域位于湟源至同德附近,深度约 30.6 km.同时可以看出,青海省居里深度整体表现为隆起和凹陷相间的条带状或块状构造.与青海省构造情况基本一致.根据居里深度所反映的构造特征,将青海省划分为

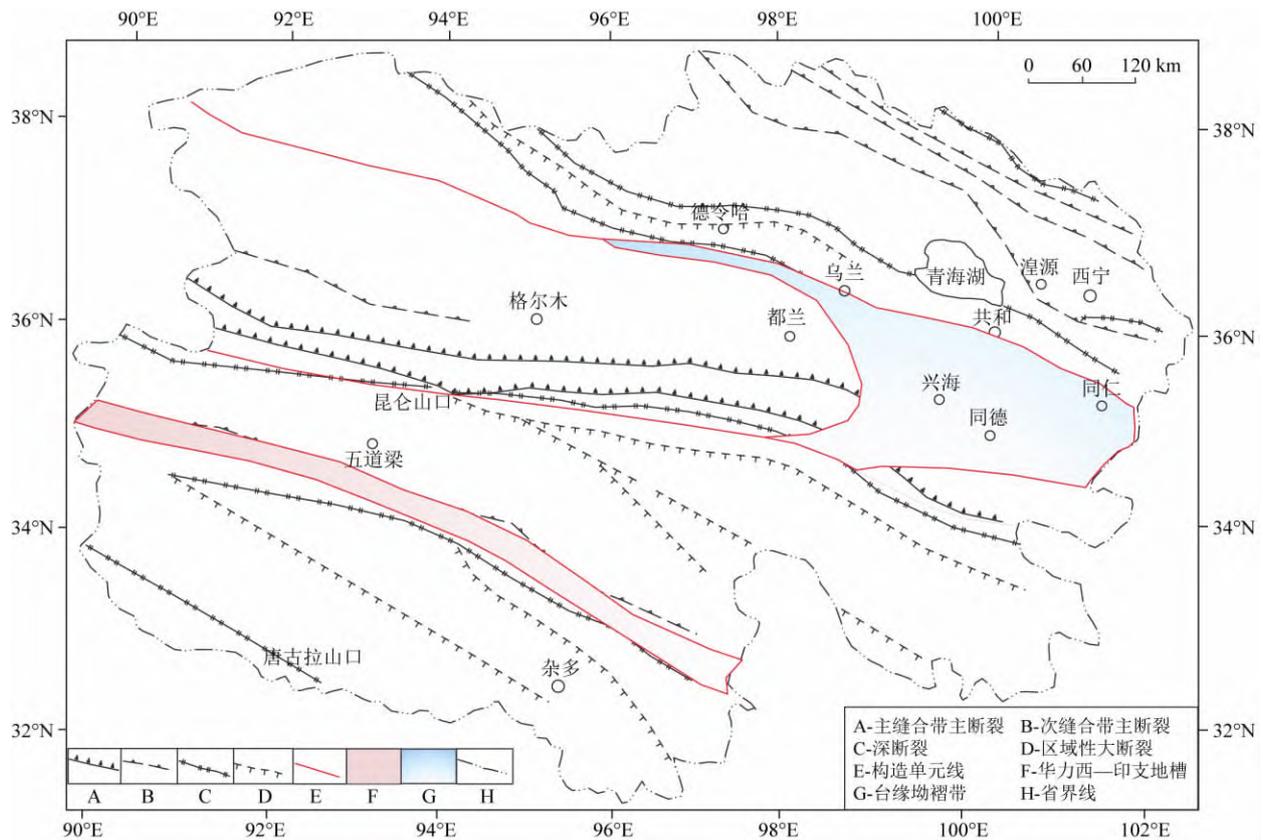


图 7 青海省主要断裂分布及大地构造区划概况(据雷玉德等, 2017 修改)

Fig. 7 The distribution of main faults and outline of geotectonic division in Qinghai Province (according to Lei Y D et al., 2017)

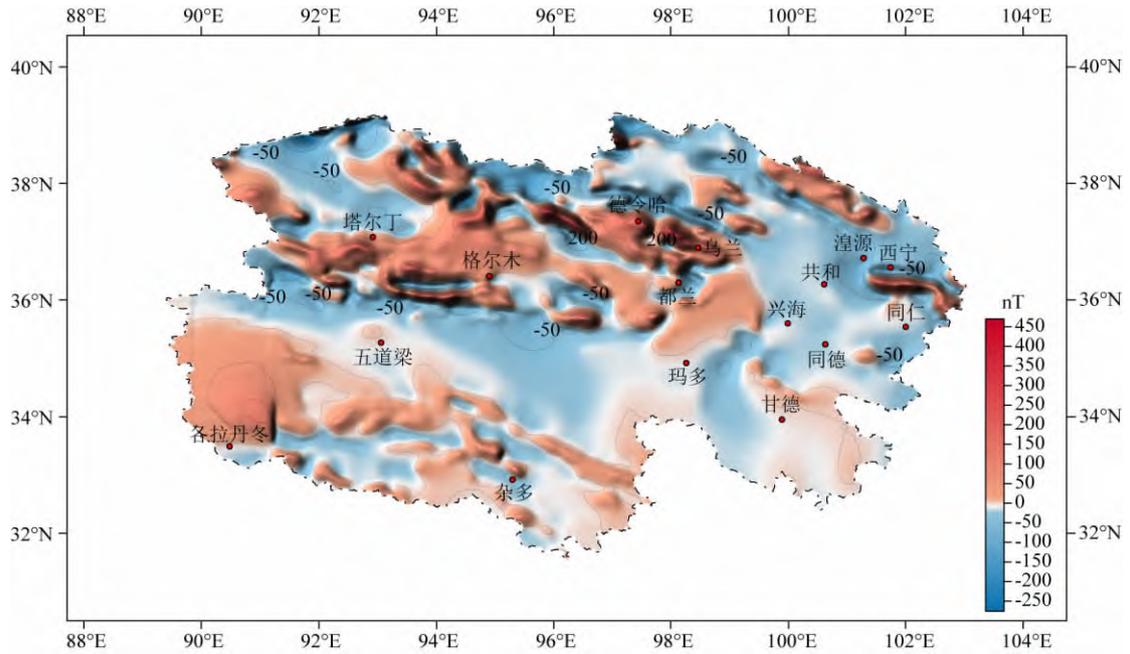


图 8 青海省航磁异常等值线图

Fig. 8 The contour map of aeromagnetic RTP anomalies in Qinghai Province

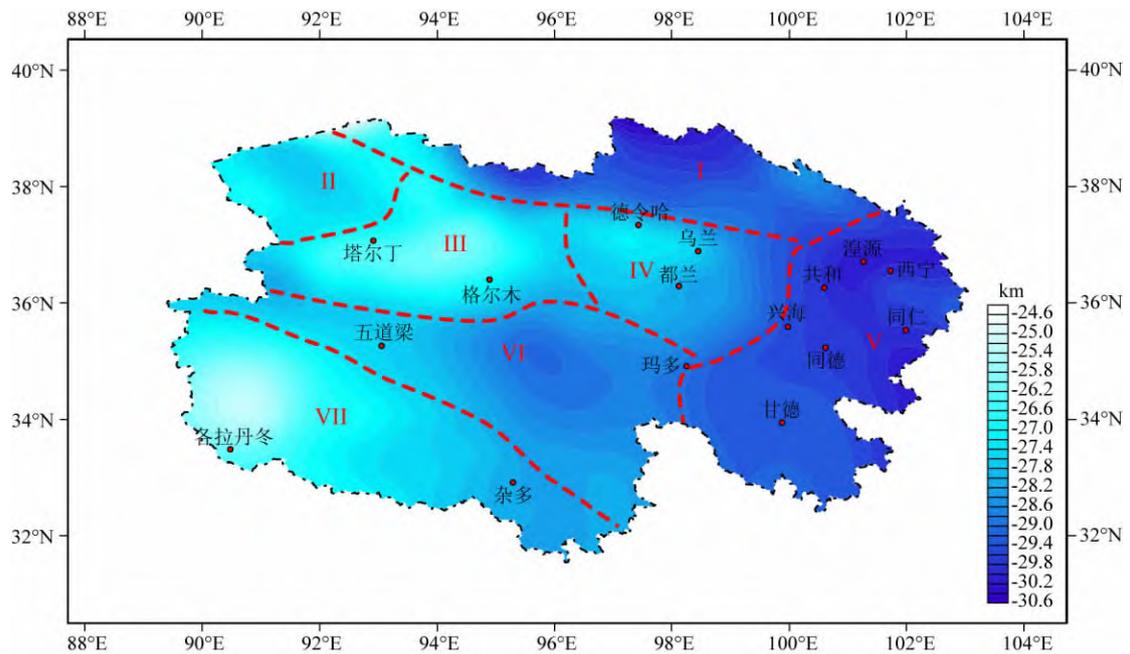


图 9 青海省居里深度反演结果

Fig. 9 The Curie depth inversion of the aeromagnetic anomaly in Qinghai Province

4 个隆起区(或II、III、IV、VII带)和 3 个拗陷区(或I、V、VI带)。

通常岩石圈热活动强烈的地方,居里面深度较浅.居里深度越浅,深部热流到表面的距离越短,越有利于干热岩的形成.因此,居里面隆起位置更有利于干热岩的形成,当常规的地质调查方法无法探测干热岩的隐伏位置和深度时,反演居里深度是间接解决这一问题的最简单、最经济的方法(梁学堂等,

2015).结合青海省居里深度、地热流值和温泉分布等特征,初步预测了两个符合干热岩分布特征的地区:德令哈—乌兰隆起带(IV)和格拉丹冬—杂多隆起带(VII).

3.1 德令哈—乌兰隆起带(IV)

该区北部和南部发育深部大型断裂构造,为地幔热流的上升提供了有利通道.此外,岩浆活动较为频繁,区内有许多印支期中酸性侵入岩(徐纪人等,

2005;张宏飞等,2006)。花岗岩本身也能产生相当高的放射性元素,且含有大量石英,导热系数高,为深部热流的上升流提供了良好的储热载体。该区地表分布着导热系数低的古片麻岩,具有良好的封闭条件。因此,就干热岩的产生、储存和封存条件而言,该地区是寻找干热岩的理想地区。同时,该区东侧共和、兴海等地区分布有许多中低温温泉(张盛生等,2019)。这是该区地热活动强烈的有力证据,也间接证明了该区是干热岩形成的有利场所。

3.2 格拉丹冬—杂多隆起带(Ⅶ)

区内北西向断裂构造发育良好(图8)。在杂多地区也有隐伏的东北走向的深断裂(陈秉芳,2013),它们有很深的热流上涌通道。航磁异常表明,该区深部存在岩浆活动,可能存在沿深断裂侵入的岩浆房或隐伏的大中型酸性大岩体,是深部储能的良好载体。区内分布有导热系数较低的沉积盖层,盖层条件较好。上述证据表明,该区具有形成干热岩的存、储、盖条件,是寻找干热岩的理想地区。根据地热流资料,格拉丹冬—杂多是青海省的高热流区(汪集旻等,2012),这也是干热岩形成的有力证据。

4 结论

本文基于经典 Parker-Oldenburg 界面反演方法,将其与向下延拓方法进行了类比,同时结合波数域正则-积分迭代下延法,提出了改进正则-积分迭代的 Parker-Oldenburg 界面反演法。模型试验表明,该方法能够较准确的对起伏界面进行反演,反演结果连续,接近理论模型的真实深度,在一定程度上可以对噪声进行压制。基于对提出方法原理分析与模型试验,可以认为该方法能够较为有效的计算界面起伏反演。

从对青海省居里面反演的结果中可以看出,青海省居里深度表现为隆起和凹陷相间的条带状或块状构造。通过研究居里深度特征,结合区域地质、大地热流值和地表温泉分布,预测了相对居里深度相对浅层的干热岩隐伏位置,旨在为该区今后的干热岩勘探提供更多的基础资料支撑。

References

Aboud E, Salem A, Mekki M. 2011. Curie depth map for Sinai Peninsula, Egypt deduced from the analysis of magnetic data. *Tectonophysics*, 506(1-4): 46-54.

Afshar A, Norouzi G H, Moradzadeh A, et al. 2017. Curie point depth, geothermal gradient and heat-flow estimation and geothermal anomaly exploration from integrated analysis of aeromagnetic and gravity data on the Sabalan Area, NW Iran. *Pure and Applied Geophysics*, 174(3): 1133-1152.

Aydin İ, Karat H İ, Koçak A. 2005. Curie-point depth map of Turkey. *Geophysical Journal International*, 162(2): 633-640.

Aydin İ, Oksum E. 2010. Exponential approach to estimate the Curie-temperature depth. *Journal of Geophysics and Engineering*, 7(2): 113-125.

Blakely R J. 1995. *Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 278-294.

Chen B F. 2013. Potential analysis of ore prospecting at adjacent area in Narigongma mining area of Zaduo county of Qinghai [Master's thesis](in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

ElNabi S H A. 2012. Curie point depth beneath the Barramiya-Red Sea coast area estimated from spectral analysis of aeromagnetic data. *Journal of Asian Earth Sciences*, 43(1): 254-266.

Gómez-Ortiz D, Agarwal B N P. 2005. 3DINVER. M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm. *Computers & Geosciences*, 31(4): 513-520.

Granser H. 1986. Convergence of iterative gravity inversion. *Geophysics*, 51(5): 1146-1147.

Guspi F. 1993. Noniterative nonlinear gravity inversion. *Geophysics*, 58(7): 935-940.

Hansen P C. 1992. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve. *SIAM Review*, 34(4): 561-580.

Hansen P C, O'Leary D P. 1993. The use of the L-curve in the regularization of discrete ill-posed problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 14(6): 1487-1503.

Hsieh H H, Chen C H, Lin P Y, et al. 2014. Curie point depth from spectral analysis of magnetic data in Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 26-33.

Khojamli A, Ardejani F D, Moradzadeh A, et al. 2017. Determining fractal parameter and depth of magnetic sources for Ardabil geothermal area using aeromagnetic data by de-fractal approach. *Journal of Mining and Environment*, 8(1): 93-101.

Lei Y D, Tong J, Yang Z M, et al. 2017. Resource types and typical geothermal models of hot dry rocks in Qinghai. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology* (in Chinese), 15(4): 117-122.

Li C F, Shi X B, Zhou Z Y, et al. 2010. Depths to the magnetic layer bottom in the South China Sea area and their tectonic implications. *Geophysical Journal International*, 182(3): 1229-1247.

Liang X T, Liu L, Li Y, et al. 2015. Characteristics of curie depth interface and distribution forecast of hot dry rock in Hubei province. *Resources Environment & Engineering* (in Chinese), 29(6): 999-1005.

Liu L, Zhou J P, Wu T, et al. 2021. Magnetic characteristics of

- basalt on mid-ocean ridge. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 36(5): 1880-1890, doi: 10.6038/pg2021EE0403.
- Liu Z, Zeng Z F, Li J, et al. 2019. Inversion calculation of Curie depth based on dual magnetic interface and variable susceptibility model. *Global Geology* (in Chinese), 38(3): 795-804.
- Obande G E, Lawal K M, Ahmed L A. 2014. Spectral analysis of aeromagnetic data for geothermal investigation of Wikki Warm Spring, north-east Nigeria. *Geothermics*, 50: 85-90.
- Oldenburg D W. 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39(4): 526-536.
- Parker R L. 1973. The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International*, 31(4): 447-455.
- Pham L T, Oksum E, Do T D. 2018. GCH_gravinv: A MATLAB-based program for inverting gravity anomalies over sedimentary basins. *Computers & Geosciences*, 120: 40-47.
- Pilkington M. 2006. Joint inversion of gravity and magnetic data for two-layer models. *Geophysics*, 71(3): L35-L42.
- Qu N N, Li J B, Zhang X J, et al. 2019. Study of deep structural feature in Guizhou based on gravity and magnetic data. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(5): 1785-1793, doi: 10.6038/pg2019CC0310.
- Ravat D, Pignatelli A, Nicolosi I, et al. 2007. A study of spectral methods of estimating the depth to the bottom of magnetic sources from near-surface magnetic anomaly data. *Geophysical Journal International*, 169(2): 421-434.
- Reamer S K, Ferguson J F. 1989. Regularized two-dimensional Fourier gravity inversion method with application to the Silent Canyon caldera, Nevada. *Geophysics*, 54(4): 486-496.
- Regińska T. 1996. A regularization parameter in discrete ill-posed problems. *Siam Journal on Scientific Computing*, 17(3): 740-749.
- Ross H E, Blakely R J, Zoback M D. 2006. Testing the use of aeromagnetic data for the determination of Curie depth in California. *Geophysics*, 71(5): L51-L59.
- Ruiz F, Introcaso A. 2004. Curie point depths beneath Precordillera Cuyana and Sierras Pampeanas obtained from spectral analysis of magnetic anomalies. *Gondwana Research*, 7(4): 1133-1142.
- Shuey R T, Schellinger D K, Tripp A C, et al. 1977. Curie depth determination from aeromagnetic spectra. *Geophysical Journal International*, 50(1): 75-101.
- Spector A, Grant F S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293-302.
- Tian T, Zhang J F, Jiang W L, et al. 2017. Using gravity and magnetic data to study the crustal structure characteristics of microplates in Yanbian, Jilin, China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 91(9): 1905-1924.
- Tselentis G A. 1991. An attempt to define curie point depths in Greece from aeromagnetic and heat flow data. *Pure and Applied Geophysics*, 136(1): 87-101.
- Wang D H, Zhang J F, Wang X, et al. 2018. Analysis of aeromagnetic anomalies and deep structures of Jiangsu segment of Tan-Lu fault zone and its adjacent region. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 33(4): 1419-1429, doi: 10.6038/pg2018BB0234.
- Wang J Y, Hu S B, Pang Z H, et al. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China. *Science & Technology Review* (in Chinese), 30(32): 25-31.
- Xiong S Q, Yang H, Ding Y Y, et al. 2016. Characteristics of Chinese continent Curie point isotherm. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(10): 3604-3617, doi: 10.6038/cjg20161008.
- Xiong X S, Gao R, Li Q S, et al. 2009. Moho depth of Qinghai-Tibet plateau revealed by seismic probing. *Journal of Earth Science*, 20(2): 448-463.
- Xu J R, Zhao Z X, Ishikawa Y. 2005. Extensional stress field in the central and Southern Qinghai-Tibetan Plateau and dynamic mechanism of geothermic anomaly in the Yangbajain area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(4): 861-869, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.018.
- Xue G Q, Qian H, Jiang M, et al. 2003. Studies on the velocity structure of crust-upper mantle beneath Northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 24(1): 19-26.
- Zeng X N, Li X H, Niu C, et al. 2013. Regularization-integral iteration in wavenumber domain for downward continuation of potential fields. *Geophysical Prospection for Petroleum* (in Chinese), 48(4): 643-650.
- Zhang H F, Chen Y L, Xu W C, et al. 2006. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai province: Petrogenesis and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 22(12): 2910-2922.
- Zhang S S, Zhang L, Tian C C, et al. 2019. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe Basin. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 25(4): 501-508.
- Zhou B, Peng J B, Zhang J. 2009. Development and distribution patterns of active fault zones in Qinghai Province. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 17(5): 612-618.
- Zhou W S, Dong P, Wang L S, et al. 2014. Gravity and magnetic anomalies and deep structure in the Sanjiang Basin. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(6): 2620-2627, doi: 10.6038/pg20140623.

附中文参考文献

- 陈秉芳. 2013. 青海省杂多县纳日贡玛矿区外围找矿潜力分析[硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 雷玉德, 童珏, 杨占梅等. 2017. 青海省干热岩资源类型及典型地热模式. *南水北调与水利科技*, 15(4): 117-122.
- 梁学堂, 刘磊, 李义等. 2015. 湖北省居里面特征与干热岩分布预测. *资源环境与工程*, 29(6): 999-1005.
- 刘隆, 周建平, 吴涛等. 2021. 大洋中脊玄武岩磁性特征. *地球物理学进展*, 36(5): 1880-1890, doi: 10.6038/pg2021EE0403.
- 刘卓, 曾昭发, 李静等. 2019. 基于双磁性界面和变磁化率模型的居里面深度反演计算. *世界地质*, 38(3): 795-804.

- 屈念念, 李家斌, 张西君等. 2019. 基于重磁资料研究贵州省深部构造特征. 地球物理学进展, 34(5): 1785-1793, doi: 10.6038/pg2019CC0310.
- 田甜, 张景发, 姜文亮等. 2017. 基于重磁场的延边微板块地壳结构特征研究. 地质学报, 91(9): 1905-1924.
- 王德华, 张景发, 王鑫等. 2018. 郑庐断裂带江苏段及邻区航磁异常与深部构造特征. 地球物理学进展, 33(4): 1419-1429, doi: 10.6038/pg2018BB0234.
- 汪集昉, 胡圣标, 庞忠和等. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估. 科技导报, 30(32): 25-31.
- 熊盛青, 杨海, 丁燕云等. 2016. 中国陆域居里等温面深度特征. 地球物理学报, 59(10): 3604-3617, doi: 10.6038/cjg20161008.
- 徐纪人, 赵志新, 石川有三. 2005. 青藏高原中南部岩石圈扩张应力场与羊八井地热异常形成机制. 地球物理学报, 48(4): 861-869, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.018.
- 薛光琦, 钱辉, 姜枚等. 2003. 青藏高原东北部天然地震探测与岩石圈深部特征. 地球学报, 24(1): 19-26.
- 曾小牛, 李夕海, 牛超等. 2013. 位场向下延拓的波数域正则-积分迭代法. 石油地球物理勘探, 48(4): 643-650.
- 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春等. 2006. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义. 岩石学报, 22(12): 2910-2922.
- 张盛生, 张磊, 田成成等. 2019. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力. 地质力学学报, 25(4): 501-508.
- 周保, 彭建兵, 张骏. 2009. 青海省活动断裂带分布发育特征研究. 工程地质学报, 17(5): 612-618.
- 周稳生, 董平, 王良书等. 2014. 三江盆地重磁场特征与深部结构. 地球物理学进展, 29(6): 2620-2627, doi: 10.6038/pg20140623.

(本文编辑 张正峰)