

doi: 10.11720/wtyht.2021.1405

张杨,王君恒,曹炼鹏,等.曲波变换在位场信号提取中的应用研究[J].物探与化探,2021,45(1):84-94. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1405

Zhang Y, Wang J H, Cao L P, et al. A study of the application of Curvelet transform to potential field signal extraction[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 84-94. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1405

曲波变换在位场信号提取中的应用研究

张杨¹, 王君恒¹, 曹炼鹏², 冯裕华², 朱江皇², 付强²

(1. 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京 100083; 2. 深圳市地质环境监测中心, 广东深圳 518034)

摘要: 为了重磁数据中有效信号的分离与提取, 本文研究了最近十几年发展起来的一种方法: 曲波变换方法(Curvelet transform method)。从曲波变换的基本原理入手, 通过重力位场理论模型数据分析了曲波变换的多尺度分解重构能力, 并且利用加噪理论模型数据分析了曲波变换的阈值去噪能力, 此外, 还使用曲波变换对南岭东部地区布格重力异常资料进行了有效信号提取。结果验证了该方法可同时适用于位场数据的分解和去噪处理研究, 为重磁数据多尺度分析处理提供参考, 也为实际资料数据提供一定的指示作用。

关键词: 位场数据; 曲波变换; 有效信号提取; 多尺度分解; 阈值去噪

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2021)01-0084-11

0 引言

重磁勘探技术是地球物理勘探中重要的方法之一。近年来, 随着深部探测和航空重磁勘探技术的发展, 对有效信号分离提取的需求越来越大。大区域产生的背景场中, 经常包含微小的局部地质体产生的异常, 因此, 如何在密度差异或磁性差异不明显和存在强干扰的情况下, 划分出不同地质体的边界、消除干扰的背景场、去除噪声的影响, 已成为急需解决的问题^[1-4]。

Curvelet 变换是 Candès 和 Donoho 在 1999 年最先提出的方法^[5], 为了让 Curvelet 变换更容易被人们理解和使用, Candès 等先后提出第二代 Curvelet 变换框架体系, 提出两种以第二代 Curvelet 变换理论为基础的快速离散实现方法。新算法理论的提出, 使得 Curvelet 变换的实现更简单、快速, 减少了初代算法带来的复杂冗余^[6-9]。

在国内外, 许多学者将 Curvelet 变换运用于各

种数据处理, 如图像数据、地震资料数据等^[10-21]。国内学者将 Curvelet 变换运用于位场数据处理方面的研究较少, 陈召曦通过建立简单、复杂组合模型对 Curvelet 变换的多尺度、多方向性进行了分析^[22]。郇恒飞研究了 Curvelet 变换和小波阈值去噪方法在位场数据处理中的应用, 通过模型试验对两种去噪方法的效果进行对比^[23]。高铁等进行了 Curvelet 变换去噪和小波阈值去噪的实验对比, 验证了 Curvelet 变换去噪的有效性^[24]。杨斯涵研究 Curvelet 变换的多尺度分析性质及其去噪原理, 得出 Curvelet 多尺度分解后各层系数重构数据可以与地下不同深度规模异常体相对应的结论^[25]。

笔者首先介绍了 Curvelet 变换的基本原理, 然后在前人研究的基础上开发了相关 Curvelet 变换软件, 并且同时利用重力位场理论模型、加噪模型和南岭东部地区实际资料分析了 Curvelet 变换的分解和去噪能力。综合前人的研究成果, 结果表明该方法可同时适用于位场数据的多尺度分解和去噪处理研究, 为实际重磁数据的多尺度分析处理提供参考。

收稿日期: 2020-08-14; 修回日期: 2020-11-19

基金项目: 自然科学基金项目“面向海域磁测日变改正的地磁场变化试验与分析预测研究”(41574132)

作者简介: 张杨(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事地球物理方法技术研究工作。Email: 405350764@qq.com

通讯作者: 王君恒(1962-), 男, 博士, 中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院副教授、研究员, 主要从事应用地球物理和理论地球物理研究工作。Email: w1128@cugb.edu.cn

1 第二代 Curvelet 变换

第二代曲波变换是在小波变换、脊波变换和第一代曲波变换的基础上构建出来的。

二维空间 R^2 中, x 为空间的位置变量, ω 为频率域变量, r, θ 为对应频率域下的极坐标。假设存在平滑、实值非负的“角度窗” $V(t)$ (支撑域为 $t \in [-1, 1]$) 和“半径窗” $W(r)$ (支撑域区间为 $r \in (1/2, 2)$), 且满足容许性条件:

$$\begin{cases} \sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1, r \in (3/4, 3/2) \\ \sum_{l=-\infty}^{\infty} V^2(t - l) = 1, t \in (-1/2, 3/2) \end{cases}, \quad (1)$$

对于每一个尺度 $j \geq j_0$ 可以引入频率窗口 U_j , 定义频率域窗函数为:

$$U_j(r, \theta) = 2^{-3j/4} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{[j/2]} \theta}{2\pi}\right), \quad (2)$$

式中: $[j/2]$ 表示 $j/2$ 整数部分; 频率域窗函数 U_j 为极坐标下受“半径窗” W 和“角度窗” V 支撑区间限定的楔形区域。

如果 $\varphi_j(x)$ 的傅立叶变换满足等式

$$\hat{\varphi}_j(\omega) = U_j(\omega), \quad (3)$$

则定义 $\varphi_j(x)$ 为母曲波函数。所以, 在尺度 2^{-j} 上所有的曲波函数都可以由 $\varphi_j(x)$ 经过旋转与平移得到。

定义在尺度 2^{-j} , 方向为 θ_l , 在位置参量 $x_k^{(j,l)} = R_{\theta_l}^{-1}(k_1 \cdot 2^{-j}, k_2 \cdot 2^{-j/2})$ 处曲波函数为:

$$\varphi_{j,l,k}(x) = \varphi_j(R_{\theta_l}(x - x_k^{(j,l)})), \quad (4)$$

式中: R_{θ} 是旋转角为 θ 的矩阵, R_{θ}^{-1} 是它的逆矩阵;

$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}, R_{-\theta} = R_{\theta}^{-1}.$$

所以任何一个函数 $f \in L^2(R^2)$ 的曲波变换系数 $c(j, l, k)$ 可以通过此函数 f 与某一尺度上的曲波函数 $\varphi_{j,l,k}$ 的内积来表示:

$$c(j, l, k) = \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{R^2} f(x) \overline{\varphi_{j,l,k}(x)} dx. \quad (5)$$

将地球物理数据应用于曲波变换时, 地球物理数据可看作函数 f , 如本文使用的重力位场数据; 将重力位场数据函数 f 与曲波函数 $\varphi_{j,l,k}$ 进行内积 $c(j, l, k) = \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle$, 就可以得到不同尺度下的曲波系数 $c(j, l, k)$; 对得到的曲波系数 $c(j, l, k)$ 进行处理并反曲波变换重构, 就可得到处理后的重力位场数据函数 f' 。

2 Curvelet 变换应用

2.1 位场数据模型分离重构试验

二维数据函数 f 经过 Curvelet 多尺度变换分解后, 在不同方向和不同分解尺度上都有对应的一组系数:

$$\begin{cases} C_{j,0}(k_1, k_2) \\ C_{j,l}(k_1, k_2) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $C_{j,0}(k_1, k_2)$ 为分解后原结果的低频系数, 相当于数据的粗尺度部分, 在该频带上无方向性; $C_{j,l}(k_1, k_2)$ 为尺度 j , 方向 l 下的高频系数, 相当于数据的精细尺度部分。按照需要对不同尺度的系数进行处理, 以达到实现数据的融合、去噪、多尺度、多方向等处理的要求, 然后对处理后的系数进行选择性的反 Curvelet 变换重构, 就可以得到处理后的结果。对于 512×512 的二维数据, 经过 Curvelet 变换后, 可以得到 Curvelet 系数如表 1 所示。

随着层数的增加, 反 Curvelet 变换重构的图像越精细, 反映的越是高频成分和数据的细节部分, 层数越低, 反映的越是粗糙成分和低频成分。使用 Curvelet 变换就是把原始数据按照数据的大小多尺度分解为不同的层数, 默认的层数大小设置为 $\text{ceil}(\log_2 \min(M, N) - 3)$ 。对于 512×512 的二维数据, Curvelet 变换分解为 6 层系数。

将 Curvelet 变换应用到重力数据, 设置了 5 个场源体(直立六面体)和观测面组成的理论模型, 观

表 1 512×512 数据的 Curvelet 系数结构

Table 1 Curvelet coefficient structure of 512×512 data

层次	尺度系数	方向参数个数	矩阵形式	矩阵形式	矩阵形式	矩阵形式	矩阵形式
粗糙层	$C\{1\}$	1	21×21				
细节层	$C\{2\}$	16		18×22	16×22	22×18	22×16
	$C\{3\}$	32		34×22	32×22	22×34	22×32
	$C\{4\}$	32		67×44	64×43	64×44	44×64
	$C\{5\}$	64		131×44	128×43	128×44	44×128
精细层	$C\{6\}$	1	512×512				

测面为 $z = 0$ km 的平面,观测面 z 坐标方向向下为正。5 个直立六面体场源分别编号为 A1、A2、A3、B1 和 B2,其几何参数及密度参数见表 2 所示。将 B1、B2 看作深部区域异常,A1、A2、A3 看作浅部局部异常,进行信号的分离提取。重力异常见图 1。

对图 1a 重力数据进行 Curvelet 变换,分别提取 6 层的系数进行反 Curvelet 变换重构, Curvelet 变换的多尺度分解性质能够完成位场数据的多尺度分解,可以对不同规模地质体所产生的不同尺度的重力异常进行分离,来达到重力位场多尺度分解的目的。规模大且埋藏深的地质体,重力异常通常表现为平缓的区域异常,经 Curvelet 变换后得到低层系数;规模小、埋藏浅的地质体重力异常通常表现为变化剧烈的局部异常,经 Curvelet 变换后得到高层系数(图 2)。

第 5 层和第 6 层系数反映 Curvelet 变换重构图像数据近似为 0,不能反映数据信息。将第 1 层图象定义为分解后得到的深层重力异常,重力平面图反映了埋深最深、规模最大的两个模型 B1、B2 的异常,消除了 A1、A2 模型的影响,但包含 A3 模型的影响,因为 A3 模型产生的重力异常幅值大,其重力异常在深层与浅层都有所体现。将第 2 层到第 4 层 Curvelet 系数重构图定义为浅层重力异常,包含埋

深最浅、规模最小 A1、A2、A3 模型的异常。与图 1 对比,可以看到 Curvelet 系数第 1 层重构图体现了区域重力异常,反映深部数据, Curvelet 系数第 2 层到第 4 层重构图体现了局部重力异常,反映浅部数据。

将 A3 模型的 z 坐标 $z_1 = 0.5$ km、 $z_2 = 1.0$ km 改为 $z_1 = 1.0$ km、 $z_2 = 1.4$ km,原始叠加模型重力异常 Curvelet 变换重构图像见图 3。

第 5 层和第 6 层系数重构图像近似为 0,不能反映数据信息。将第 1 层图象定义为 Curvelet 分解后得到的深层重力异常,重力平面图反映了埋深最深、规模最大的两个模型 B1、B2 的重力异常,A3 模型的重力异常影响被削弱,消除了 A2、A1 模型的影响,反映的是区域异常。将第 2 层系数重构图定义为中层重力异常,去掉了 B1、B2 模型体的重力异常,包含 A1、A2、A3 模型体产生的重力异常。将第 3、4 层系数重构结果定义为浅层重力异常,包含埋深最浅、规模最小 A1、A2 模型体的重力异常,去掉了 A3 模型体的影响。从分离结果来看, Curvelet 变换有效地将不同深度层上的重力数据进行了分离,从而完成了位场数据的分解。

图 3 与图 2 对比,A3 模型可以看成中层重力模型,较 B1、B2 模型埋深浅,较 A2、A1 模型埋深深,故

表 2 直立六面体场源参数统计

Table 2 Field source parameter statistics table of vertical hexahedron

模型体 序号	直立六面体角点坐标/km						剩余密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	x_1	x_2	y_1	y_2	z_1	z_2	
A1	6	8	12	13	0.4	0.8	250
A2	13	14	7	9	0.5	0.9	300
A3	5	7	5	6.5	0.5	1	500
B1	5	9	11	19	1.5	3	250
B2	10	20	5	12	1.5	3	-100

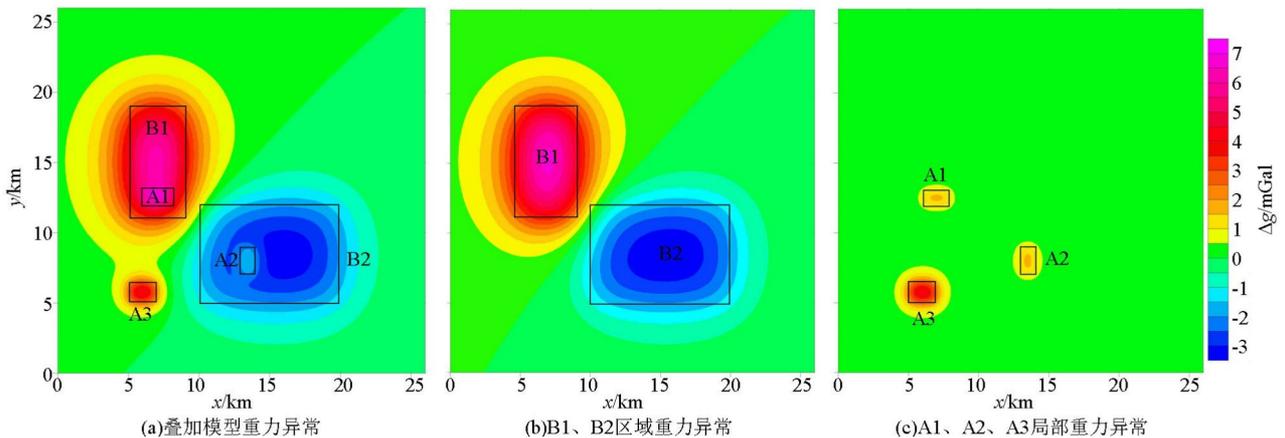


图 1 直立六面体组合重力异常

Fig. 1 Vertical hexahedron combined gravity anomaly

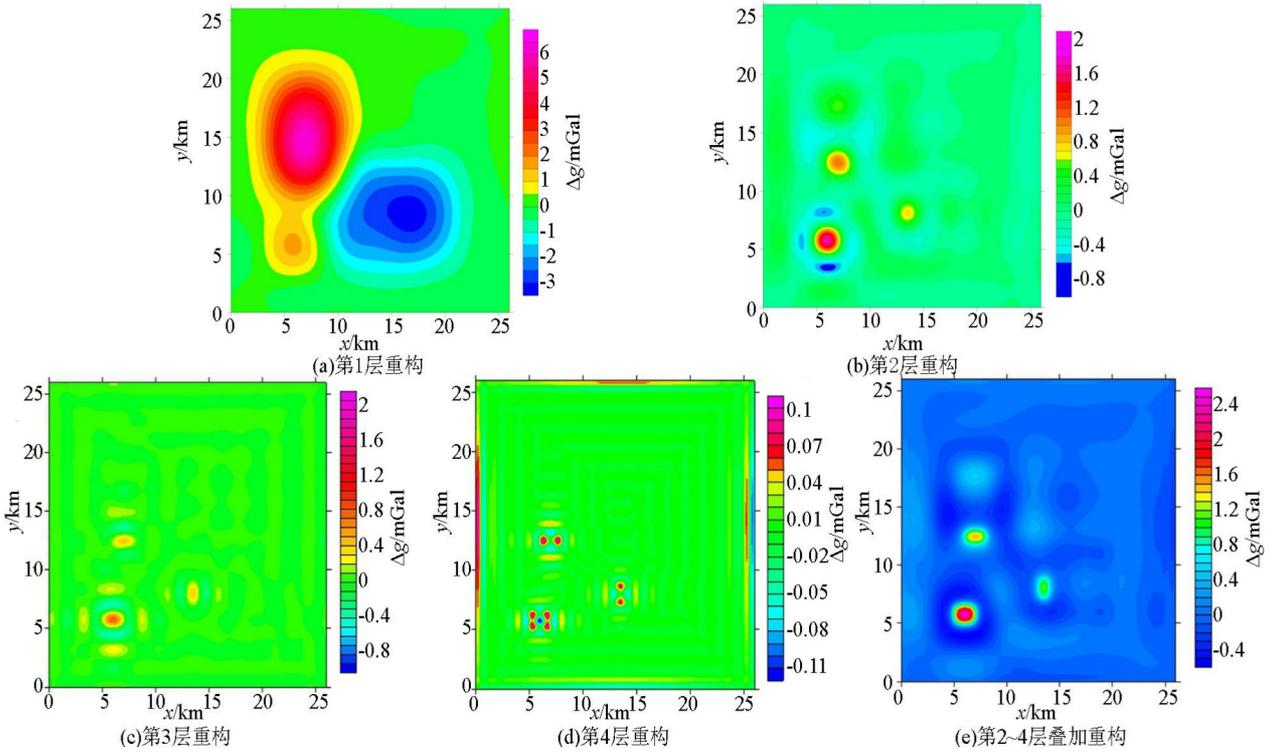


图 2 Curvelet 变换分解后的系数重构重力异常

Fig. 2 Reconstructed graph of gravity anomaly with coefficients decomposed by Curvelet transform

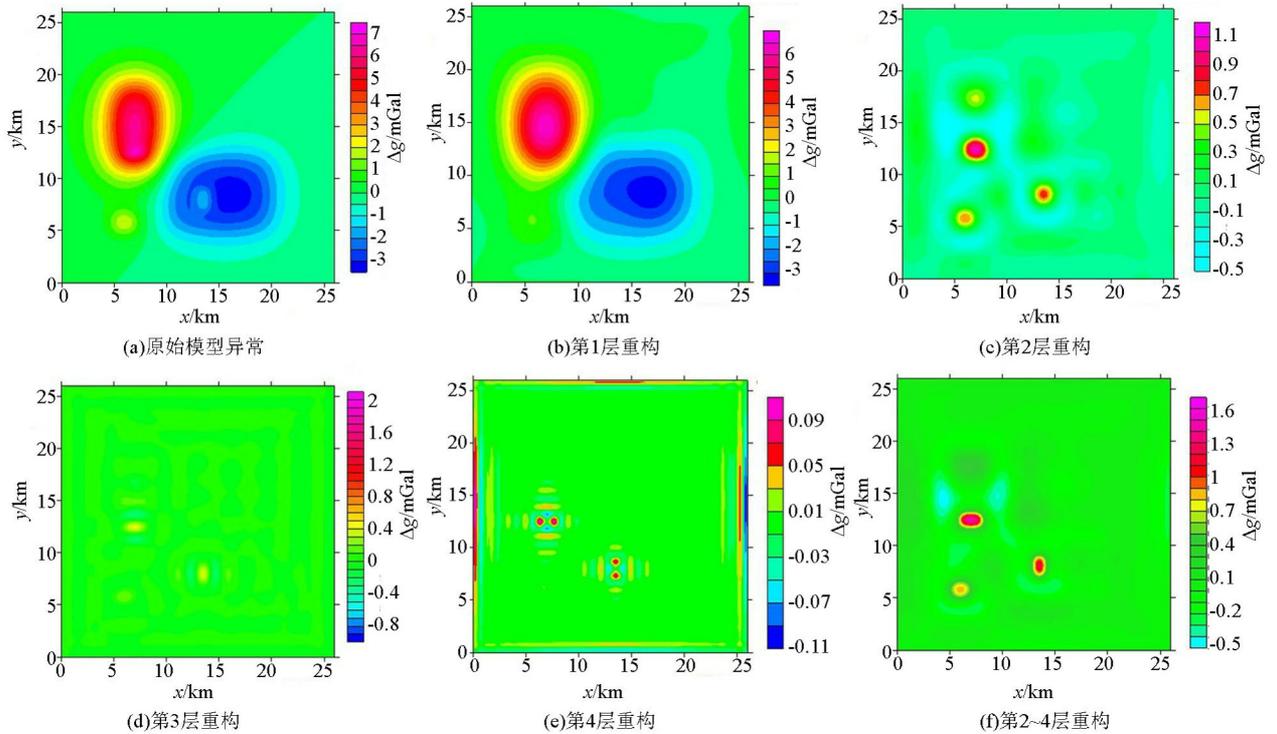


图 3 Curvelet 变换分解后的重构重力异常

Fig. 3 The reconstructed gravity anomaly map after the decomposition of the Curvelet transform

图 3 第 1 层重构图与图 2 第 1 层重构图相比, A3 模型影响减弱;图 3 第 3 层和第 4 层重构图与图 2 第 3 层和第 4 层重构图相比, 主要反映了 A1、A2 模型重

力异常, A3 模型重力异常被消除。所以, 通过建立不同埋深的异常体, 验证了该方法的分层效果。该方法分层结果与异常体大小、埋深和密度有关, 分解

的系数层数越高,反映的越是浅层异常或局部异常;系数层数越低,反映的越是深层异常或区域异常。

2.2 阈值去噪模型试验

Curvelet 变换去噪的原理是,数据经过 Curvelet 变换之后,噪声通常在变换后会表现为绝对值很小的系数,所以,我们可以引入阈值分割的理念,对分解后每一层系数进行阈值分割,将数值较小的系数设置为 0,对数值较大的系数则进行保留。实际数据中的有效信息通常在 Curvelet 变换后表现为数值较大的系数。因此,通过这种阈值判断,可以保留原始数据中的重要信息,进而消除噪声的干扰,再将处理后的系数进行反 Curvelet 变换重构,就达到了去噪的目的。此外,由于曲波变换实现了不同尺度、层次数据的分解,对分解后各层系数进行分析,可以发现,噪声通常集中在最高几层系数中,有时可以直接将具有严重噪声的系数层去掉,便可实现噪声滤除。

阈值去噪方法包含硬阈值、软阈值、自适应阈值等。此外,还可以根据不同情况对 Curvelet 变换系数进行处理来达到滤波的目的。

本文采用硬阈值去噪方法来处理位场数据资料,硬阈值去噪处理的方法原理是将大于设定阈值的系数保留,而小于阈值的系数设置为零。

$$\bar{C}_p = \begin{cases} C_p & |C_p| \geq T_m \\ 0 & |C_p| < T_m \end{cases}, \quad (7)$$

式中: C_p 为原始数据的 Curvelet 变换系数; T_m 是设

置的阈值; \bar{C}_p 为处理过后的系数。

对原始数据进行去噪可以分为 3 个步骤:

- 1) 对原始加噪数据进行 Curvelet 变换多尺度分解;
- 2) 对 Curvelet 变换分层系数采用硬阈值法,对每层系数进行处理;
- 3) 将处理过后的 Curvelet 变换系数进行反 Curvelet 变换,就可以得到经过阈值处理后的数据重构图。

将表 2 中重力位场数据加 5% 重力幅值的随机噪声进行 Curvelet 变换处理(图 4),可以看出噪声集中在 4、5 层,即高层系数重构数据中,第 3 层中也有少部分噪声干扰。

去噪是通过对 Curvelet 系数进行硬阈值处理来实现的,最精细的尺度层被设置为 $4 \times \sigma_{jl}$ 阈值,其他层数选择 $3 \times \sigma_{jl}$ 的阈值,这里 σ_{jl} 是规模为 j 和角度 l 的系数的噪声水平(等于噪声水平乘以相应曲波系数的 L2 范数)。

对原始重力异常数据加噪声,然后应用 Curvelet 变换阈值去噪(见图 5~7),由以上模型的去噪实验可以看出,Curvelet 变换阈值去噪方法效果良好,可以去掉不同幅值噪声的影响。

2.3 实际资料处理

南岭位于华南地区的中南部,广泛发育不同成因、时代的花岗岩,盛产与花岗岩有密切成因关系的

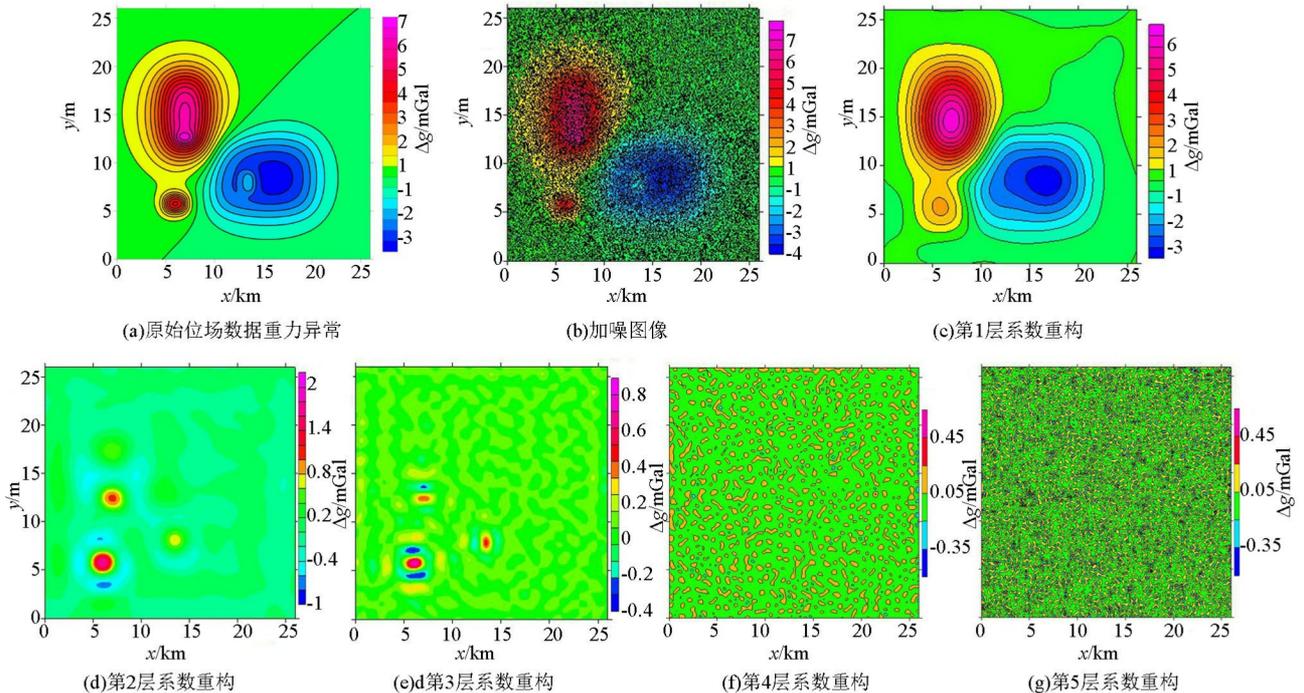


图 4 加噪数据曲波变换重构

万方数据 Fig. 4 The reconstructed image with noise-added data using Curvelet transform

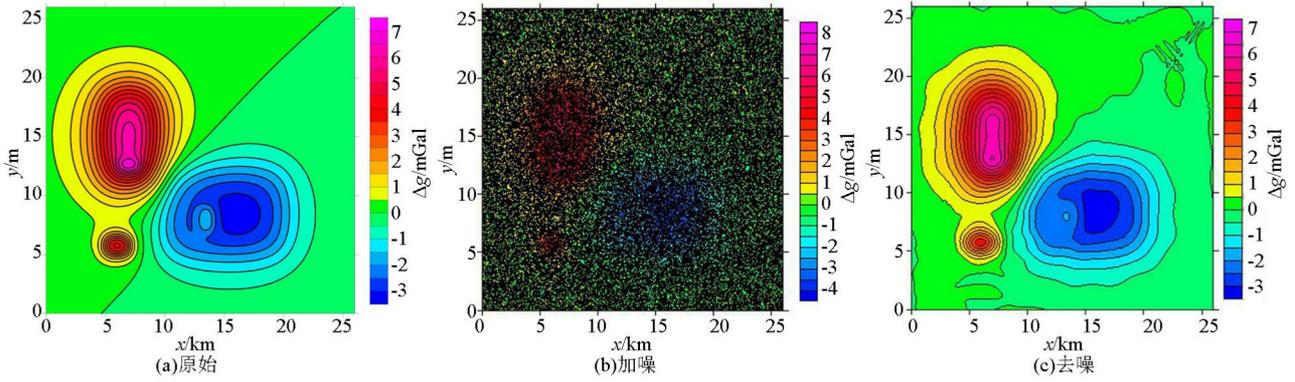


图 5 加噪数据 Curvelet 变换阈值去噪(加 10% 幅值随机噪声, $\sigma=0.8$)

Fig. 5 Curvelet transform threshold denoising of noise-added data (add 10% amplitude random noise, $\sigma=0.8$)

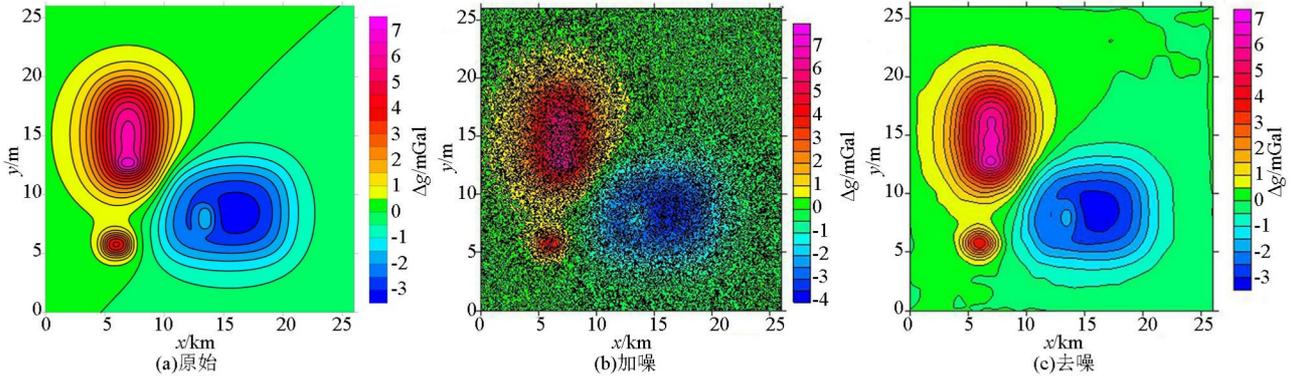


图 6 加噪数据 Curvelet 变换阈值去噪(加 5% 幅值随机噪声, $\sigma=0.45$)

Fig. 6 Curvelet transform threshold denoising of noise-added data (add 5% amplitude random noise, $\sigma=0.45$)

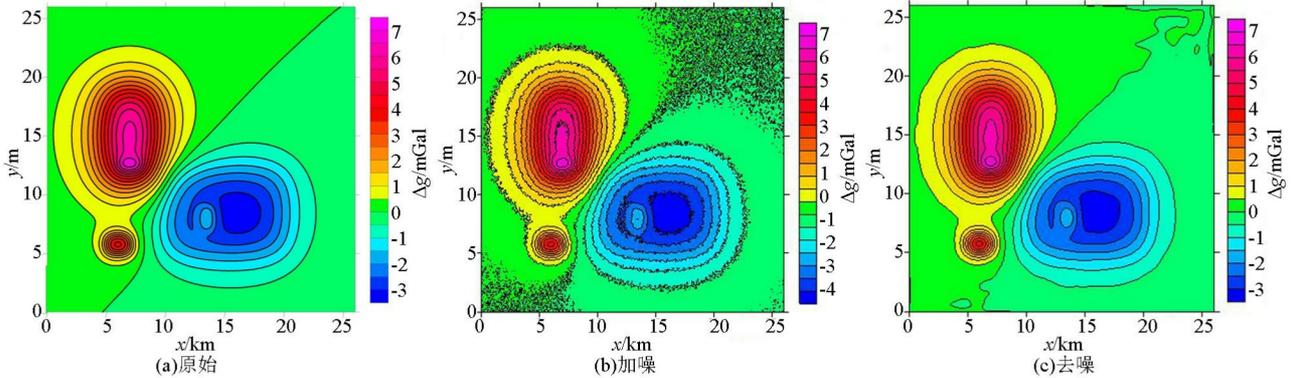


图 7 加噪数据 Curvelet 变换阈值去噪(加 1% 幅值随机噪声, $\sigma=0.15$)

Fig. 7 Curvelet transform threshold denoising of noise-added data (add 1% amplitude random noise, $\sigma=0.15$)

钨、锡稀有金属矿产,其成矿条件独特,而且成矿潜力巨大,专家学者对该区域的研究历史十分悠久^[26-30]。

本次处理的重力位场实际资料是南岭东部区域 EGM2008 布格重力异常,数据范围:经度 $114^{\circ} \sim 116^{\circ}$,纬度 $24^{\circ}30' \sim 26^{\circ}$,网格化成大概 $1' \times 1'$ 的间距(见图 8)。研究区地形见图 9。

南岭东部 EGM2008 布格重力异常是该区域地质体信息的综合反映,包括了壳内各种偏离正常密

度分布的矿体与构造的影响,也包括了地壳下界面起伏的影响等。从原始资料(图 8)可以看出,中部区域以及东南角区域布格重力异常值高,对应地形图中地形高程相对较低,西北角区域布格重力异常值最低,对应地形图中地形高程相对较高,布格重力异常范围为 $-115 \sim -15$ mGal,布格重力异常能与地形图高程信息联系起来。

对南岭东部 EGM2008 布格重力异常数据进行 Curvelet 变换处理,分解为 4 层 Curvelet 系数,将第 1

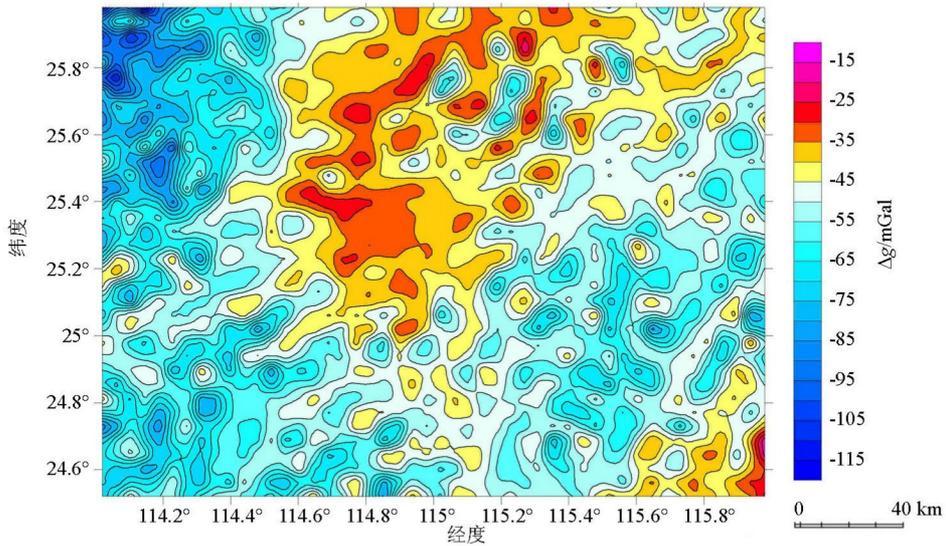


图 8 南岭东部 EGM2008 布格重力异常

Fig. 8 Bouguer gravity anomaly map of EGM2008 in the eastern part of Nanling

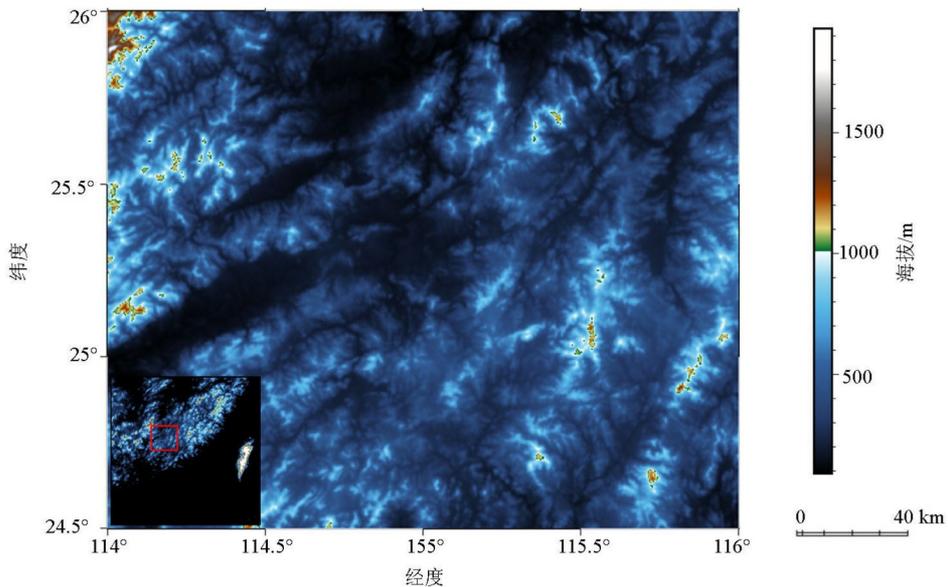


图 9 研究区地形

Fig. 9 Topographic map of the study area

层曲波系数设为深部层,第 2 层曲波系数设为中部层,第 3 层曲波系数设为浅部层,第 4 层曲波系数设为噪声干扰层,对深部层、中部层、浅部层和干扰层曲波系数进行反 Curvelet 变换重构,就可以得到深层、中层、浅层和噪声干扰层重力异常平面(图 10)。

综合前人研究成果,如参考罗凡华南地区卫星布格重力异常和华南地区仅反映莫霍面变化的卫星布格重力异常^[31],结合图 10a 可以认为第 1 层 Curvelet 系数重构重力异常图近似为深部区域异常,消除了大部分局部异常的干扰。大体上中部区域和东南角区域重力异常高,对应该区域地形高程值相对较小,西北角区域重力异常值低,对应该区域地形高

程值相对较大,能与地形图高程信息联系起来。重力异常范围为-95~-32 mGal,红色为重力异常高值,蓝色为重力异常低值。

对于图 10b 中,第 2 层系数重构重力异常图近似为中层深度局部异常体或构造产生的重力异常。图 10c 中,第 3 层系数重构重力异常图近似为浅层局部异常体或各种地质构造产生的重力异常。图 10d 为高频干扰异常。

将图 10c 中第 3 层系数重构重力异常图与该区域地质图(图 11)进行对比,对比图见图 12,可以看到地质图中标定的钨矿与锡矿的岩体分布(深蓝色和棕色圆圈)与图 10c 中重力异常体的分布和走向

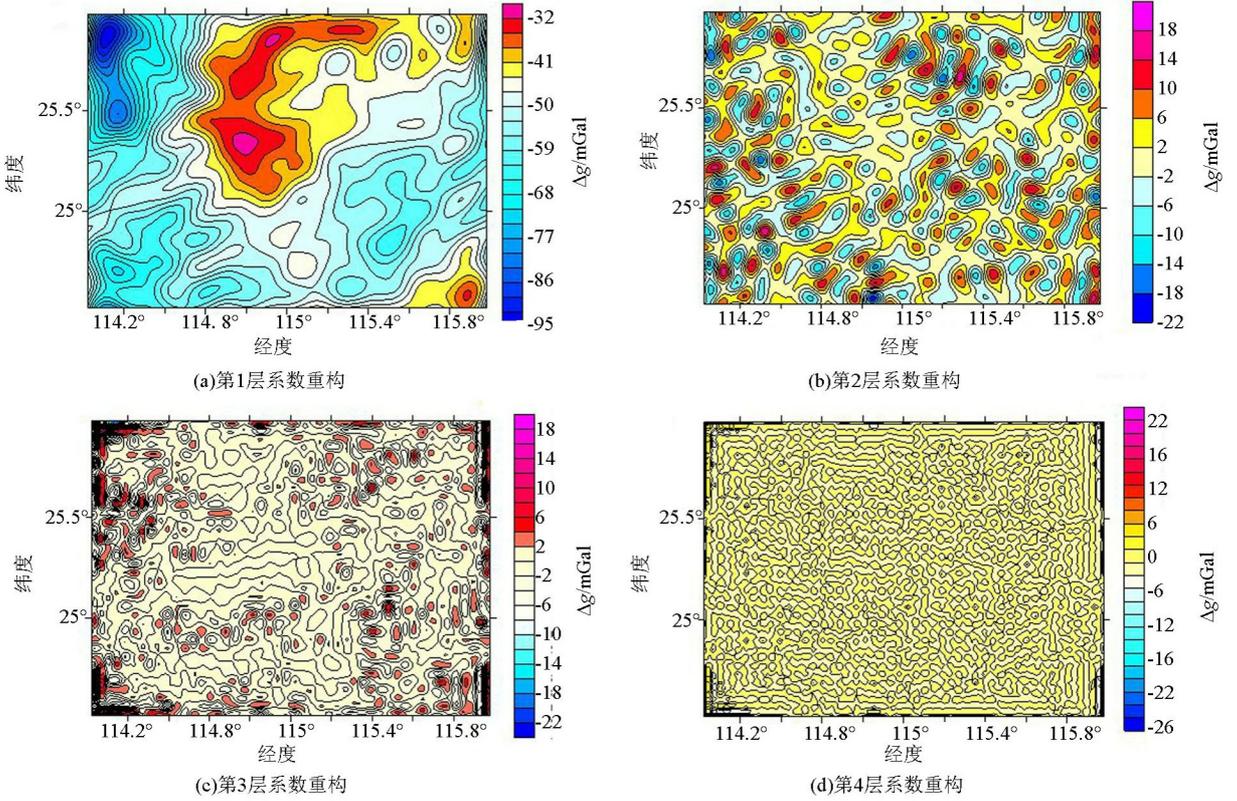


图 10 Curvelet 变换重构重力异常

Fig. 10 The reconstructed gravity anomaly map using Curvelet transform

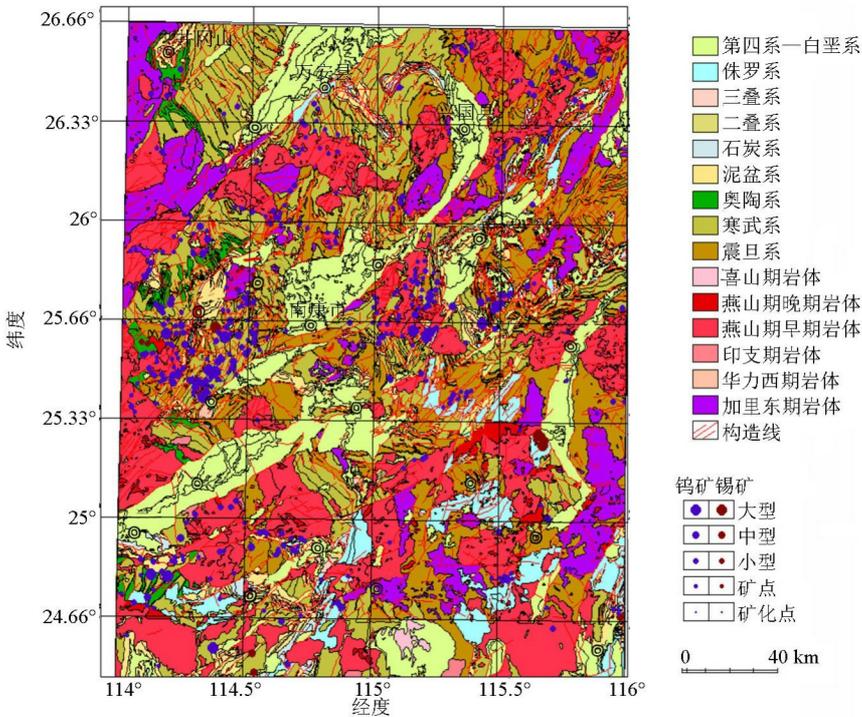


图 11 南岭东部地质简图

Fig. 11 Geological sketch map of eastern Nanling

大致相似,可以认为图 10c 主要反映了浅层密度不均矿体分布数据岩体边界及各种地质构造等产生

的局部重力异常,对浅地表矿体分布或地质构造等信息具有一定指示作用。

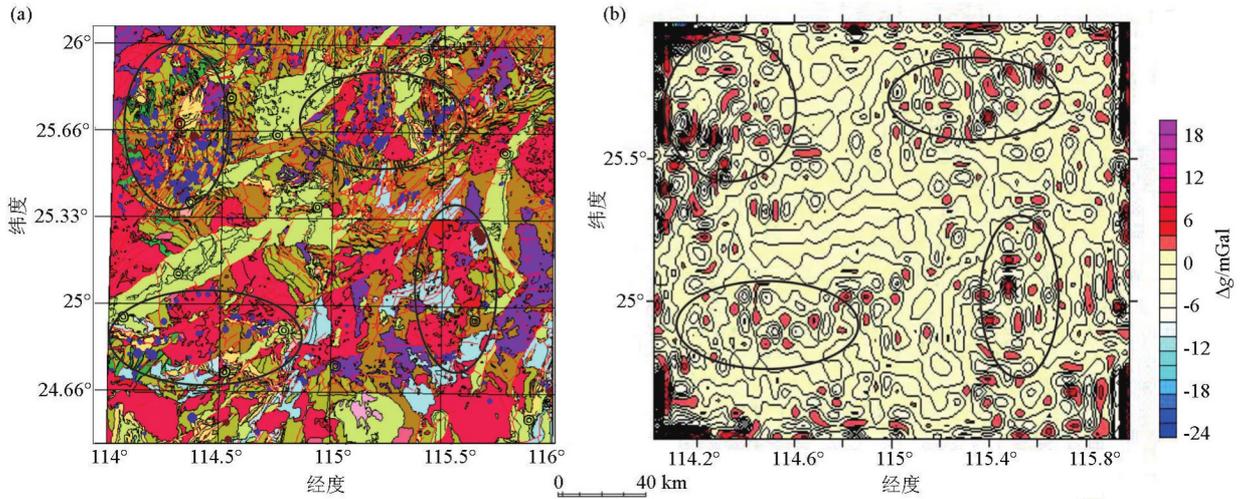


图 12 南岭东部地质简图 (a) 与重力异常 (b) 对比

Fig. 12 Comparison of geological sketch map (a) and gravity anomaly map (b) of eastern Nanling

3 结论

1) Curvelet 变换根据原始数据的大小将其分解为不同尺度的系数,各个尺度的系数又可以经过处理后反 Curvelet 变换为重构数据,并且各个尺度的系数相互之间可以叠加、增删。

2) Curvelet 变换阈值去噪中,噪声信号为高频细节信号,一般在分解重构的高层系数中,对高层系数进行阈值处理可以有效去掉噪声的干扰。

3) Curvelet 变换运用于位场数据中,可以近似的认为,低层系数重构数据表示深层区域异常信号,中层系数重构数据表示中层异常体产生的信号,高层系数重构图表示浅层局部异常体信号。由南岭实测数据处理看出,低层 Curvelet 系数重构重力异常可以近似认为深部区域重力异常,高层 Curvelet 系数重构重力异常可以近似认为浅层密度不均匀矿体、花岗岩岩体边界及各种地质构造等产生的局部重力异常,对浅地表地质体或各种地质构造信息具有一定指示作用。

致谢:感谢审稿人和编辑对本文提出的宝贵意见。感谢中国地质大学(北京)同学和深圳市地质环境监测中心的帮助。

参考文献 (References):

[1] 熊盛青. 我国航空重磁勘探技术现状与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 113 - 117.
Xiong S Q. The present situation and development of airborne gravity and magnetic survey techniques in China[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 113 - 117.

[2] 柳建新, 孙成东, 陈波, 等. 重磁方法在国内外金属矿中的研究

进展[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 713 - 722.

Liu J X, Sun H L, Chen B, et al. Review of the gravity and magnetic methods in the exploration of metal deposits[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 713 - 722.

[3] 邢怡. 重磁异常分离方法技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.

Xing Y. Research in the method of separating anomalous gravity and magnetic data [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.

[4] 刘金兰. 重磁位场新技术与山西断陷盆地构造识别划分研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.

Liu J L. Development new technologies for potential field processing and research on the tectonic recognition division of shanxi fault basin [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.

[5] Candès E, Donoho D. Curvelets: A surprisingly effective nonadaptive representation of objects with edges[M]. TN: Vanderbilt University Press, 1999.

[6] Candès E, Donoho D. New tight frames of curvelets and optimal representations of objects with C2 singularities [R]. Stanford: Technical Report, 2002.

[7] Candès E, Demanet L. Curvelets and Fourier integral operators [R]. To appear in Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Serie I, 2002.

[8] Candès E, Guo F. New multiscale transforms, minimum total variation synthesis; Applications to edge-preserving image reconstruction[J]. Signal Processing, 2002, 82: 1519 - 1543.

[9] Candès E, Demanet L, Donoho D, et al. Fast discrete curvelet transforms[J]. SI-AM Multiscale Modeling and Simulation, 2006, 5: 861 - 899.

[10] Herrmann F J, Wang D L, Hemenfent G. Multiple prediction from incomplete data with the focused curvelet transform[C]//Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 2007: 2505 - 2509.

[11] Ramesh N, Domimique G, Mohamed T, et al. Coherent and random noise attenuation using the curvelet transform [J]. The Leading

- Edge, 2008, 27(2): 240-248.
- [12] Huub D, Maarten V. Wave-character preserving pre-stack map migration using curvelets [C]//Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, 2004: 961-964.
- [13] 单昊. 基于几何小波的多目标图像分割与地震去噪[D]. 北京:清华大学, 2010.
- Shan H. Geometric wavelet based image segmentation with multiple objects and seismic denoising[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [14] 邱菊. 基于小波变换和二代曲波变换的乳腺钼靶 X 片图像增强[D]. 长春:吉林大学, 2009.
- Qui J. The enhancement of molybdenum target X-ray image based on wavelet transform and the second generation Curvelet transform [D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [15] 朱为, 李国辉, 涂丹. 一种基于第 2 代曲波变换的尺度相关图像去噪方法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(12): 2281-2285.
- Zhu W, Li G H, Tu D. A scale correlation image denoising method based on the second generation Curvelet transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2008, 13(12): 2281-2285.
- [16] 杨俊, 李静和, 孟淑君, 等. 小波与曲波变换探地雷达数据去噪对比分析[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 2097-2105.
- Yang J, Li J H, Meng S J, et al. Comparative analysis of ground penetrating radar data denoising with wavelet transform and curvelet transform[J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(5): 2097-2105.
- [17] 李红雨, 杨长保, 吴燕冈, 等. 小波变换在位场资料去噪和位场分离中的应用[J]. 世界地质, 2014, 33(1): 200-208.
- Li H Y, Yang C B, Wu Y G, et al. Application of wavelet transform for de-noising and potential field separation in gravity and magnetic data processing[J]. Global Geology, 2014, 33(1): 200-208.
- [18] 隋成兴. 曲波变换在地震信号处理中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- Sui C X. Study on the applications of Curvelet transform in seismic data processing [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [19] 张华, 陈小宏, 李红星, 等. 曲波变换三维地震数据去噪技术[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(2): 226-232+192.
- Zhang H, Chen X H, Li H X, et al. 3D seismic data de-noising approach based on Curvelet transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(2): 226-232, 192.
- [20] 董烈乾, 李振春, 王德营, 等. 第二代 Curvelet 变换压制面波方法[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(6): 897-904, 1012, 831-832.
- Dong L Q, Li Z C, Wang D Y, et al. Ground-roll suppression based on the second generation Curvelet transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2011, 46(6): 897-904, 1012, 831-832.
- [21] 杨扬, 戴明, 周笋鱼. 基于均匀离散曲波变换的多聚焦图像融合[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2547-2552.
- Yang Y, Dai M, Zhou L Y. Uniform discrete Curvelet transform for multi-focus image fusion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(9): 2547-2552.
- [22] 陈召曦. 位场数据的曲波变换与信息提取应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- Chen Z X. The Curvelet transform and its application to information extraction for potential data[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012.
- [23] 郇恒飞. 重力数据综合处理与解释在钾盐矿区的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- Huan H F. Study on integrated processing and interpretation of gravity data for the application in sylvite mine[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [24] 高铁, 郇恒飞, 徐英奎, 等. Curvelet 变换在位场数据去噪中的应用[J]. 世界地质, 2014, 33(3): 671-679.
- Gao T, Huan H F, Xu Y K, et al. Application of Curvelet transform denoising in potential field data [J]. Global Geology, 2014, 33(3): 671-679.
- [25] 杨斯涵. 重磁位场分离及边界识别方法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- Yang S H. Study on the separation of gravity and magnetic potential field and boundary recognition method[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [26] 杨文采. 揭开南岭地壳形成演化之谜[J]. 地质论评, 2016, 62(2): 257-266.
- Yang W C. Raise the curtain on formation and evolution of Nanling mountains[J]. Geological Review, 2016, 62(2): 257-266.
- [27] 陈国雄, 刘天佑, 孙劲松, 等. 南岭成矿带多尺度重力场及深部构造特征——《地球科学——中国地质大学学报》征稿简则[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2014, 39(2): 240-251.
- Cheng G X, Liu T Y, Sun J S, et al. Characteristics of multi-scale gravity field and deep structures in Nanling metallogenic belt 《Earth Science—Journal of China University of Geosciences》[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(2): 240-251.
- [28] 陈骏, 王汝成, 朱金初, 等. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 111-121.
- Chen J, Wang R C, Zhu J C, et al. Multiple-aged granitoids and related tungsten-tin mineralization in the Nanling Range, South China [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(1): 111-121.
- [29] 孙劲松. 南岭成矿带重磁场特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- Sun J S. Study on the characteristics of gravity and magnetic field in Nanling Metallogenic Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [30] 徐先兵, 梁承华, 陈家驹, 等. 南岭构造带基础地质特征与成矿地质背景[J/OL]. 地球科学, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200617.1745.006.html>.
- Xu X B, Liang C H, Chen J J, et al. Fundamental geological features and metallogenic geological backgrounds of the Nanling Tectonic Belt[J/OL]. Earth Science, 2020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20200617.1745.006.html>.
- [31] 罗凡, 严加永, 付光明, 等. 华南地区地壳厚度变化及对成矿类型的制约: 来自卫星重力数据的约束[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 759-774.
- Luo F, Yan J Y, Fu G M, et al. Crust thickness and its apocalyptic of mineralization in South China: Constraint from Satellite Gravity data [J]. Geology in China, 2019, 46(4): 759-774.

A study of the application of Curvelet transform to potential field signal extraction

ZHANG Yang¹, WANG Jun-Heng¹, CAO Lian-Peng², FENG Yu-Hua², ZHU Jiang-Huang², FU Qiang²

(1. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Center for Environmental Monitoring of Geology, Shenzhen 518034, China)

Abstract: In order to separate and extract the effective signals from gravity and magnetic data, the authors studied a method developed in the past ten years—Curvelet transform method. Starting with the basic principles of the Curvelet transform, the authors analyzed the multi-scale decomposition and reconstruction ability of the Curvelet transform through the theoretical model data of the gravity potential field, and analyzed the threshold denoising ability of the Curvelet transform by the noise-added theoretical model data. In addition, the Curvelet transform was used to extract effective signals from the Bouguer gravity anomaly data in the eastern part of Nanling. The results verify that the method can be applied to both the decomposition and denoising processing of potential field data. The results provide a reference for the multi-scale analysis and processing of gravity and magnetic data as well as a certain indication for actual data.

Key words: potential field data; Curvelet transform; effective signal extraction; multi-scale decomposition; threshold denoising

(本文编辑:王萌)