



## 联合BEMD和WMM方法实现位场多尺度边界检测

张双喜, 刘金钊, 张品, 陈兆辉

引用本文:

张双喜, 刘金钊, 张品, 陈兆辉. 联合BEMD和WMM方法实现位场多尺度边界检测[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2022, 47(4): 533–542.

ZHANG Shuangxi, LIU Jinzhao, ZHANG Pin, CHEN Zhaozhi. Multi-scale Edge Detection of Potential Field Using the BEMD and WMM Methods[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 533–542.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 基于改进VMD的变形特征提取与分析

Deformation Feature Extraction and Analysis Based on Improved Variational Mode Decomposition

武汉大学学报 · 信息科学版. 2020, 45(4): 612–619 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180286>

#### 基于ICEEMD-ICA与MDP准则的变形监测数据去噪方法

Denoising Method for Deformation Monitoring Data Based on ICEEMD-ICA and MDP Principle

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1658–1665 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190174>

#### 尺度因子的MAD估计及其在测量平差中的应用

MAD Estimate of Scale Factor and Its Applications in Measurement Adjustment

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1636–1640 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190166>

#### 基于渐消因子的改进Kalman滤波时间尺度估计算法

An Improved Kalman Filter Time Scale Algorithm Based on Forgetting Factor

武汉大学学报 · 信息科学版. 2019, 44(8): 1205–1211, 1219 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180065>

#### 高分辨率可见光遥感图像舰船目标检测综述

A Survey on Ship Detection Technology in High-Resolution Optical Remote Sensing Images

武汉大学学报 · 信息科学版. 2021, 46(11): 1703–1715 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200481>



# 联合 BEMD 和 WMM 方法实现位场 多尺度边界检测

张双喜<sup>1</sup> 刘金钊<sup>1</sup> 张 品<sup>1</sup> 陈兆辉<sup>1</sup>

1 中国地震局第一监测中心,天津,300180

**摘要:**利用不同尺度下的位场数据进行边界检测可获得相应的多尺度边界信息,其在区域地质构造单元划分、地质填图、矿产资源圈定和结晶基底研究等方面具有广泛应用。通过联合二维经验模态分解(bi-dimensional empirical mode decomposition, BEMD)和小波模极大值(wavelet modulus maximum, WMM)方法实现位场数据多尺度分解及各尺度异常边界检测,首先,证明了BEMD方法能够实现对位场的多尺度分解,且分解各尺度异常具有实际地质含义;然后,对构建的模型重力异常进行边界检测,结果显示,WMM方法具有良好的抗噪声干扰能力,能够清晰、准确地检测出组合模型体的边界位置、走向及分布范围;最后,将该联合方法用于三峡地区布格重力异常的多尺度分解和各级固有模态函数的边界检测,结合径向对数功率谱曲线对分解各尺度异常进行场源深度估计,得到了三峡地区不同深度层位上的构造或岩体线性分布特征,并对各尺度异常边界检测结果与区域地质构造特征进行了比较分析和解释,验证了该方法的优越性和有效性。

**关键词:**二维经验模态分解;小波模极大值;位场;多尺度边界检测

中图分类号:P237

文献标志码:A

地质构造的边界识别是指对地下断裂构造、块体边界等线性分布的地质构造在地面上的分布位置进行定位,判断地下不同物性差异(如密度、磁化率和电阻率等)的构造带、不同岩性差异地质块体等构造的线性特征位置分布和变化范围。在不同密度或磁化率变化差异的地质构造边界位置,重磁数据异常变化较为明显,因此位场数据被广泛应用到地下地质构造的线性特征增强和提取中,且有较好的应用效果<sup>[1-2]</sup>。目前,位场边界检测方法主要包括数值计算类和数理统计类两大类,均需导数或高阶导数运算,观测数据若存有干扰噪声,会放大计算过程中的数据误差,影响线性边界的准确定位。此外,小波模极大值(wavelet modulus maximum, WMM)方法是具有抗噪声干扰能力较强的位场边界检测方法,该方法即使在存有噪声异常干扰的情况下也可对线性构造进行清晰、准确的定位<sup>[3]</sup>。

地表观测得到的位场异常通常是地下不同埋深的构造或地质体在观测面产生的综合叠加响应,具有多源性、非线性、非稳态性的特征。在位场数据资料处理过程中,可从位场数据异常中

提取研究对象所产生的异常信息<sup>[4-5]</sup>。二维经验模态分解(bi-dimensional empirical mode decomposition, BEMD)<sup>[6-7]</sup>方法能够自适应地将数据中的各种频率成分有效分离出来,具有多分辨率的特性,其多尺度分解过程可以从高频到低频进行逐次尺度滤波,各尺度分解分量都反映了不同频次的模态特征。文献[8-10]将BEMD方法应用到位场多尺度分解中,并结合径向对数功率谱曲线对分解各尺度异常进行了分析和解释,取得了较好的应用效果。

本文首先通过建立模型重力位场数据,验证WMM方法在存有噪声干扰的情况下对线性构造进行定位和提取的有效性;其次利用BEMD方法对研究地区布格重力异常进行自适应多尺度分解,获得不同深度上构造或岩体线性分布特征;然后充分利用BEMD和WMM方法各自的数据处理优势特征,联合上述两种方法实现对分解各尺度异常进行场源边界检测,获得了不同深度上的场源边界信息;最后结合研究区域地质构造变化特征对各尺度下的边界异常信息进行分析和解释。

收稿日期:2021-03-10

项目资助:中国地震局“三结合”课题(3JH-202001104);国家自然科学基金(41704084);地震科技星火计划(XH20078Y)。

第一作者:张双喜,硕士,主要从事重力数据处理及应用研究。shxzhang@cug.edu.cn

## 1 基本原理

### 1.1 小波模极大值

文献[1]提出了利用小波模极大值进行边缘检测的基本原理,并在图像领域得到成功应用。假设存在函数  $\theta(x, y)$  在整个二维平面的积分为 1,且  $x, y$  在无限远处收敛到零,则称  $\theta(x, y)$  为平滑函数。那么,平滑函数  $\theta(x, y)$  在  $x, y$  方向上的二阶偏导数分别表示为:

$$\psi^x(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial x} \quad (1)$$

$$\psi^y(x, y) = \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} \quad (2)$$

因此,可以将函数  $\psi^x(x, y)$  和  $\psi^y(x, y)$  看作两个二维小波函数。

在尺度因子  $s = 2^j (j \in \mathbb{Z})$  的情况下,对于任意函数  $f(x, y) \in L^2(R)$ ,则由  $\psi^x(x, y)$  和  $\psi^y(x, y)$  定义的小波变换具有两个分量,分别为:

$$W_s^x[f(x, y)] = f(x, y) \psi_s^x(x, y) \quad (3)$$

$$W_s^y[f(x, y)] = f(x, y) \psi_s^y(x, y) \quad (4)$$

梯度矢量可表示为:

$$\begin{pmatrix} W_s^x[f(x, y)] \\ W_s^y[f(x, y)] \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} (f \theta_s)(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} (f \theta_s)(x, y) \end{pmatrix} = s \nabla (f \theta_s)(x, y) \quad (5)$$

梯度的模和相角分别表示为:

$$M_s f(x, y) = \sqrt{|W_s^x[f(x, y)]|^2 + |W_s^y[f(x, y)]|^2} \quad (6)$$

$$A_s f(x, y) = \arctan\left(\frac{W_s^y[f(x, y)]}{W_s^x[f(x, y)]}\right) \quad (7)$$

由二维网格数据结构可知,每个数据点周围有 8 个相邻数据点,分别用数字 1~8 标注,如图 1 所示。由于梯度方向的对称性,只需考虑 1~4 区域,此时数据点  $(x_0, y_0)$  相角的正切值  $\tan A_s f(x_0, y_0)$  必定落在  $[1 - \sqrt{2}, \sqrt{2} - 1]$ 、 $[\sqrt{2} - 1, \sqrt{2} + 1]$ 、 $[\sqrt{2} + 1, +\infty)$ 、 $(-\infty, -1 - \sqrt{2}]$ 、 $(-1 - \sqrt{2}, -\sqrt{2}]$  4 个区间之一,与位于 1~4 区域中某个数据的正切值存在一一对应的关系。

首先计算  $\tan A_s f(x_0, y_0)$  数值的大小,然后判断其落入的区间编号  $N$ ,将  $M_s f(x_0, y_0)$  与  $N$  区间以及  $N$  区间对称梯度方向上相邻两个数据点

进行比较,若  $M_s f(x_0, y_0)$  大于这两个点,则数据点  $(x_0, y_0)$  为局部极大值点,否则就不是局部极大值点。因此,小波模局部极大值点刻画了二维数据边缘的特征点,获取到的局部极大值点就是边界数据点。

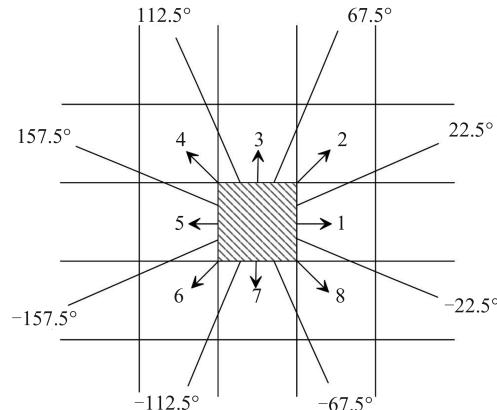


图 1 网格数据点离散梯度示意图

Fig.1 Diagram of the Discrete Gradient of the Grid Data Points

### 1.2 二维经验模态分解

文献[11-12]提出了一种自适应性地处理非线性、非平稳信号的分析方法——经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)方法,文献[13-14]将一维 EMD 拓展应用到二维数据中,利用 BEMD 方法对二维图像数据进行筛分,得到若干个不同尺度下的二维固有模态函数(bi-dimensional intrinsic mode function, BIMF)和一个剩余分量(Residue, Res)。具体分解流程见图 2。

设存在一个二维信号  $s(x, y)$ ,其中  $x=1, 2 \dots, m$ ,  $y=1, 2 \dots, n$ ( $m, n$  为正整数),利用 BEMD 方法对该信号进行多尺度分解,共得到  $K$  个二维固有模态函数 BIMF 和一个剩余分量 Res,即:

$$s(x, y) = \sum_{j=1}^K \text{BIMF}_j(x, y) + \text{Res}_K(x, y) \quad (8)$$

## 2 算例与分析

文献[10]中通过建立球体组合模型试验,利用 BEMD 方法实现了对组合模型异常的多尺度分解,并结合径向对数功率谱方法实现对分解异常的定性、半定量分析,证明 BEMD 方法对位场进行多尺度分解是有效的,且分解各尺度异常具有实际地质含义。

为了验证利用 WMM 方法进行边界检测的有效性,建立了长方体组合模型进行实验,该组合模型是由 3 个不同形态、不同埋深、不同剩余密度的

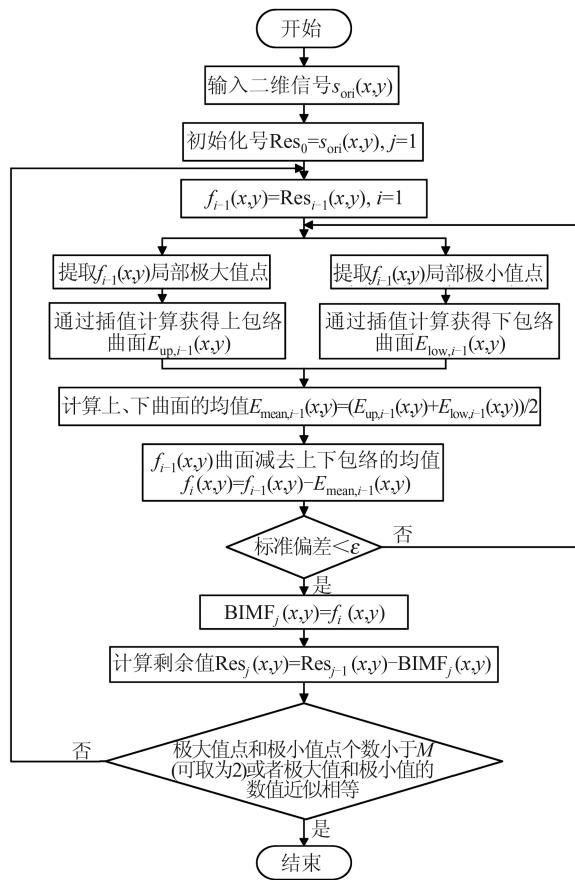
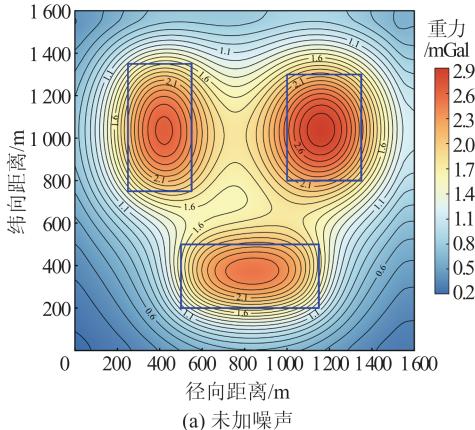


图 2 BEMD 分解流程图

Fig.2 Flowchart of BEMD Method

长方体组成,其空间分布见图 3,相关参数见表 1。



(a) 未加噪声

组合模型正演重力异常见图 4(a),为模拟组合模型重力异常中混有噪声信号,且噪声信号幅值变化相对较小,因此,向组合模型重力异常中添加信噪比为 1.8% 的高斯白噪声(见图 4(b)),其中蓝色线框为水平长方体在平面位置投影。

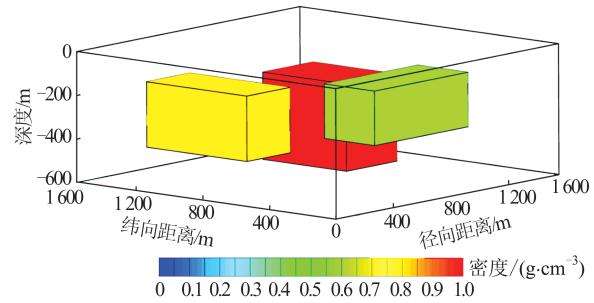


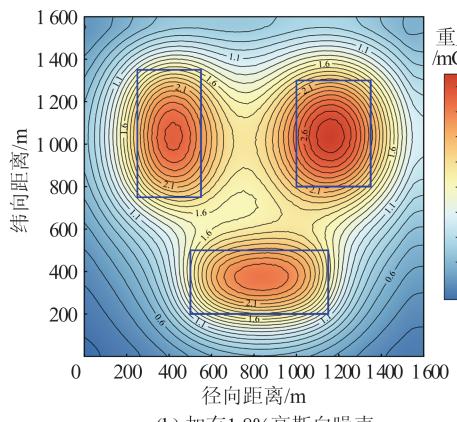
图 3 组合模型空间分布示意图

Fig.3 Schematic Diagram of the Space Distribution of Combined Model

表 1 组合模型相关参数

Tab.1 Related Parameters of the Combined Models

模型 编号	(长,宽,高)/m	上顶埋深 /m	下底埋深 /m	剩余密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
模型 1	(600, 300, 300)	150	450	0.8
模型 2	(650, 300, 250)	100	350	0.6
模型 3	(500, 350, 400)	200	600	1.0



(b) 加有 1.8% 高斯白噪声

图 4 组合模型正演重力异常

Fig.4 Gravity Anomalies of Combined Model

本文分别利用总水平梯度倾斜角(the tilt angle of the horizontal gradient, TAHG)<sup>[15]</sup>和 WMM 方法对未加噪声和加有噪声的组合模型异常数据进行处理,图 5 为 TAHG 边界检测结果,图 6 为 WMM 方法边界检测结果。从图 5、图 6 中可以看出,对未添加噪声的重力异常,两种方法均可以有效地提取长方体线性边界位置,与长方体实际边界位置能够较好地吻合,TAHG 方法计算结果存在边界效应,

并没有对内部数据造成较大影响;在添加噪声的情况下,由于 TAHG 方法属于数值类计算方法,在计算过程中需多次求导运算,高次求导运算会把噪声放大进而对整个数据造成污染,计算结果出现了较大偏差,获取的线性构造分布特征不明显,而 WMM 方法的计算结果仍能够准确、清晰地展现长方体边界位置,数据中噪声异常对计算结果未产生较大影响,具有较强的抗噪声干扰能力。

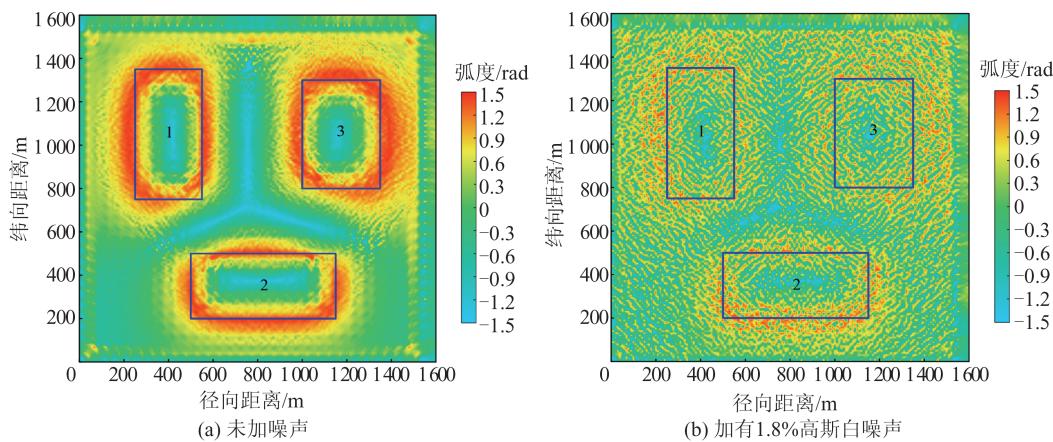


图5 TAHG边界检测结果

Fig.5 Results of Edge Detection by TAHG Method

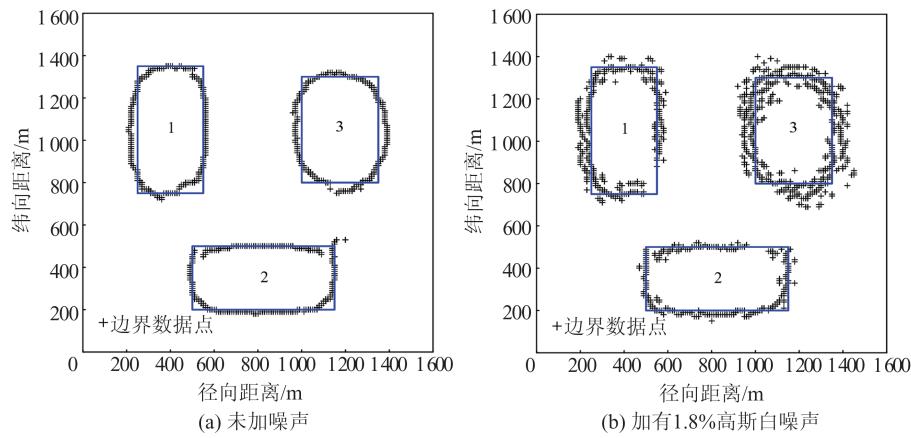


图6 WMM方法边界检测结果

Fig.6 Results of Edge Detection by WMM Method

### 3 实际应用

三峡地区西邻青藏高原高山峡谷区域,东临长江中下游平原丘陵区域,区内断裂和褶皱构造发育,地质地貌特征复杂多样。在早期燕山运动中,该地区形成了巫山、大巴山等一系列褶皱山脉,这些山脉由西南-东北走向转为东西走向,地势由南向北逐渐降低。三峡地区断裂构造较发育,断裂带构造控制着该区域的构造演化过程,地质及其相关地球物理背景比较复杂,近几十年以来,该区域受到国内外地质工作者<sup>[16-18]</sup>的密切关注。

由于布格重力异常数据在横向上具有较高的分辨率,为了研究三峡地区线性构造变化特征,利用该地区布格重力异常进行相关数据处理、分析与解释,结果见图7。由图7可知,研究区域异常整体呈现负异常,异常数值自西向东逐渐增大,存在近北北东向重力变化梯度带,三峡大坝正位于这个梯度带上,重力高值主要集中在东部江汉平原一带,重力低值覆盖了西部整个秭归

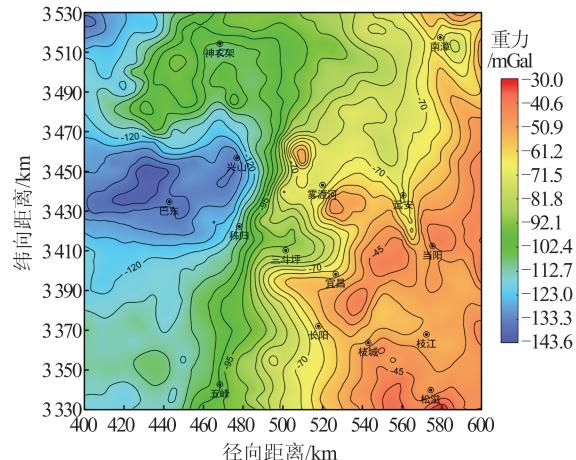


图7 研究区域布格重力异常

Fig.7 Bouguer Gravity Anomalies in Study Area

盆地地区。本文利用BEMD方法提取了研究区域不同深度层次上布格重力异常特征信息,在进行BEMD分解过程中,需要预先设置阈值参数 $\epsilon$ 判断是否已经筛选出分解分量, $\epsilon$ 可设定为较小的数,数值越小,获得的BIMF分量异常越多,但可能导致分解耗时过长。因此,为了在分解过程

中获得较多的异常细节信息,设置分解阈值  $\epsilon = 0.001$ ,运用 BEMD 方法对三峡地区布格重力异常

常进行了多尺度分解,共得到 5 个 BIMF 和一个 Res,分解结果见图 8。

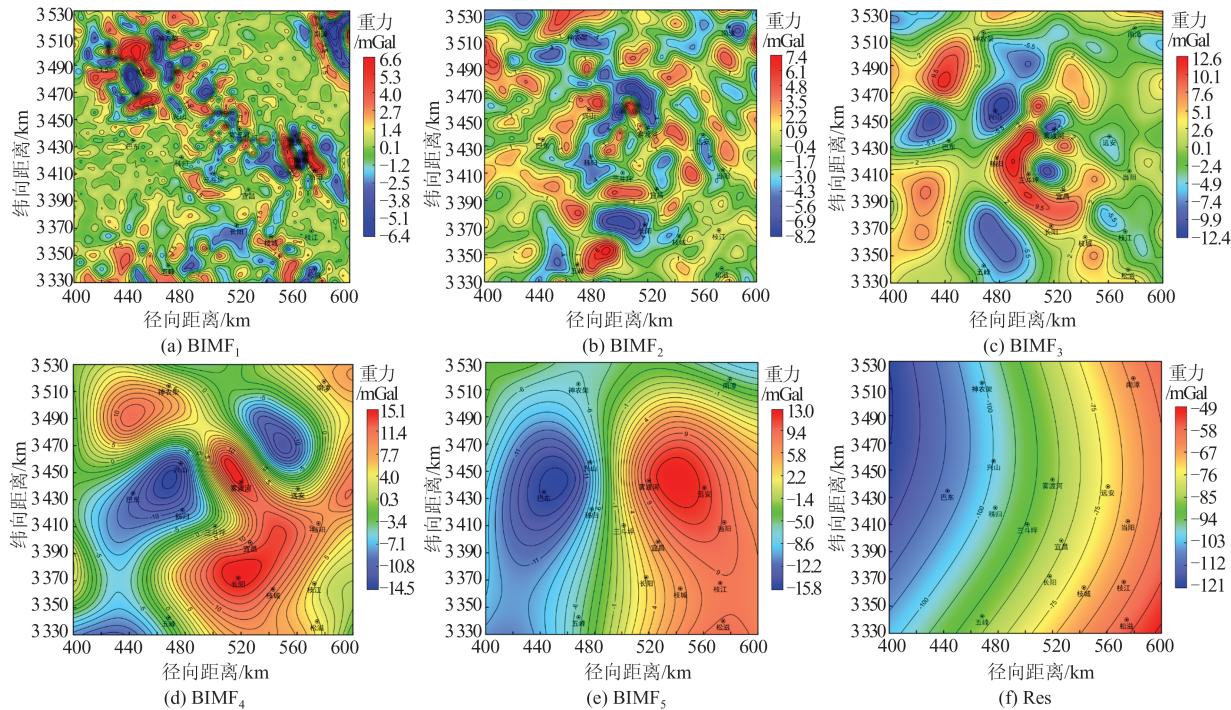


图 8 研究区域布格重力异常的 BEMD 分解结果

Fig.8 Decomposition Results of Bouguer Gravity Anomalies by BEMD Method in Study Area

由图 8 可知,随着分解阶次增加,不同尺度下的异常呈现不同的形态变化特征,表现为从高频到低频变化。BIMF<sub>1</sub>异常呈现零星状或条带状分布,且出现正负伴生的现象,异常幅值在 -6.4 ~ 6.6 mGal 之间变化,其主要是地表出露或埋藏较浅的不同密度和岩性地质体产生的;BIMF<sub>2</sub>异常多呈现条带状并伴有零星状分布,异常展布范围相对较小,异常幅值在 -8.2 ~ 7.4 mGal 之间变化,其反映了浅部岩体或线性构造变化特征;BIMF<sub>3</sub>异常幅值在 -12.4 ~ 12.6 mGal 之间变化,在研究区域中部位置存在明显的重力变化高值异常的区域,变化异常走向由北东走向转为北西走向,再转为北东走向,最后变成北西走向,形成一个整体近似菱形重力变化高值异常,异常幅值变化达 12.6 mGal,三峡大坝就位于这个高异常条带的中部位置,且三峡大坝附近存有明显的低重力异常区域,在西北部神农架地区和西南部的恩施地区都存在重力高值;BIMF<sub>4</sub>异常呈现区域性变化异常,异常变化分布范围较广,在东南部江汉平原地区有条带状正异常,秭归盆地为负异常,西北部神农架地区为高值异常,其为扬子板块出露部分,异常幅值变化较大,反映了区域深部岩性密度或构造特征变化;BIMF<sub>5</sub>异常显示研究区域有正负伴生的区域异常,西部秭归盆地地区为负异常

常,东部江汉平原为正异常,异常幅值变化较大,反映了两个区域地层起伏变化特性;Res 异常反映了该区域异常的变化趋势特征,区域异常表现为东高西低,显示了研究区域基底或者莫霍面西低东高的起伏变化情况,在大尺度上体现了该地区岩石圈变化特征。

另外,本文利用径向对数功率谱方法<sup>[19-20]</sup>计算了上述各级固有模态函数的功率谱曲线,结果见图 9,其中红色虚线为拟合直线。将图 9(a)~9(f)中曲线拟合出的直线斜率代入计算公式,得到各固有模态函数对应的场源深度,分别为 7.3 km、16.7 km、25.8 km、45.3 km、52.7 km、71.3 km。由此可知,随着分解的增加,各级固有模态函数的波长和其所对应的场源深度逐渐增大。

BIMF<sub>1</sub>、BIMF<sub>2</sub> 和 BIMF<sub>3</sub> 异常分布比较零散,异常强度和面积相对较小,可能反映了岩体或隐伏岩体、构造、地质异常体的物性和产状变化等;BIMF<sub>4</sub>、BIMF<sub>5</sub> 和 Res 异常分布较集中,分布范围较广,反映区域内岩性密度变化以及地层或基底界面起伏变化。

因此,将 BIMF<sub>1</sub>、BIMF<sub>2</sub> 和 BIMF<sub>3</sub> 相加重构出局部异常,将 BIMF<sub>4</sub>、BIMF<sub>5</sub> 和 Res 相加作为区域异常,重构结果见图 10。图 10(a)中正、负异常呈现零星或区域性变化,部分异常变化特征较明

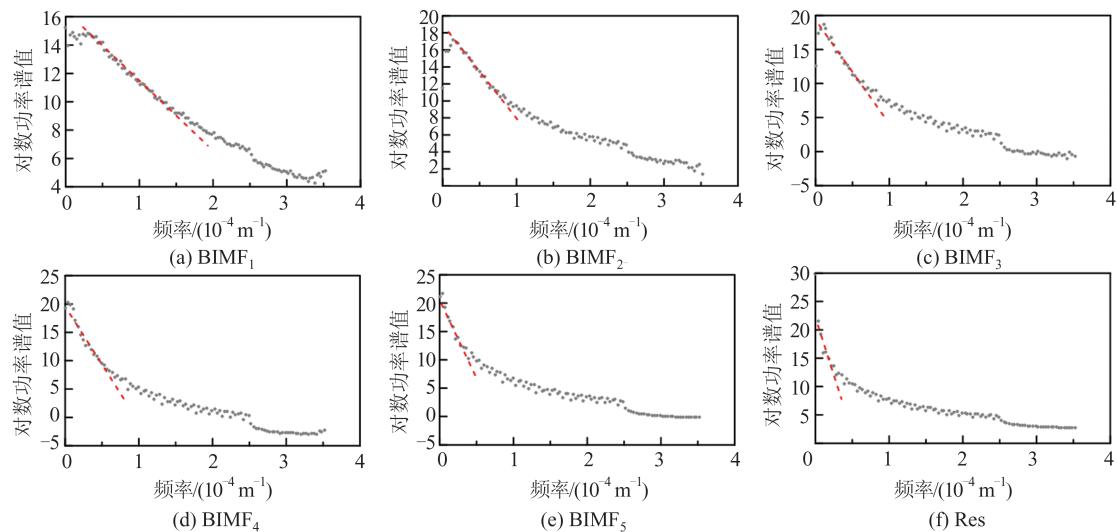


图9 BEMD分解各分量的径向对数功率谱曲线

Fig.9 Radial Logarithmic Power Spectrum Curve of Bi-dimensional Intrinsic Mode Function at All Levels by BEMD Method

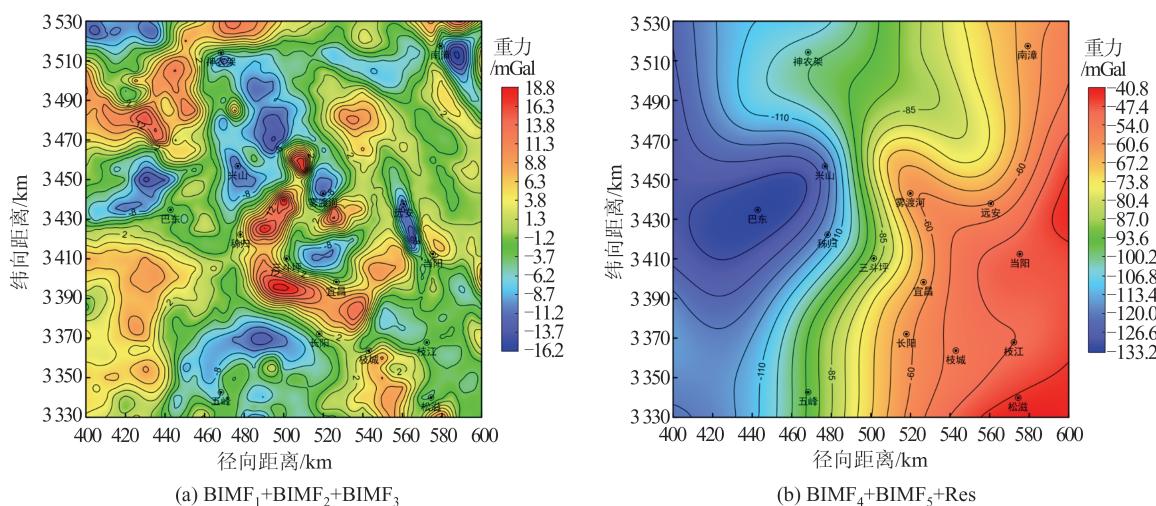


图10 研究区域布格重力异常BEMD分解重构异常

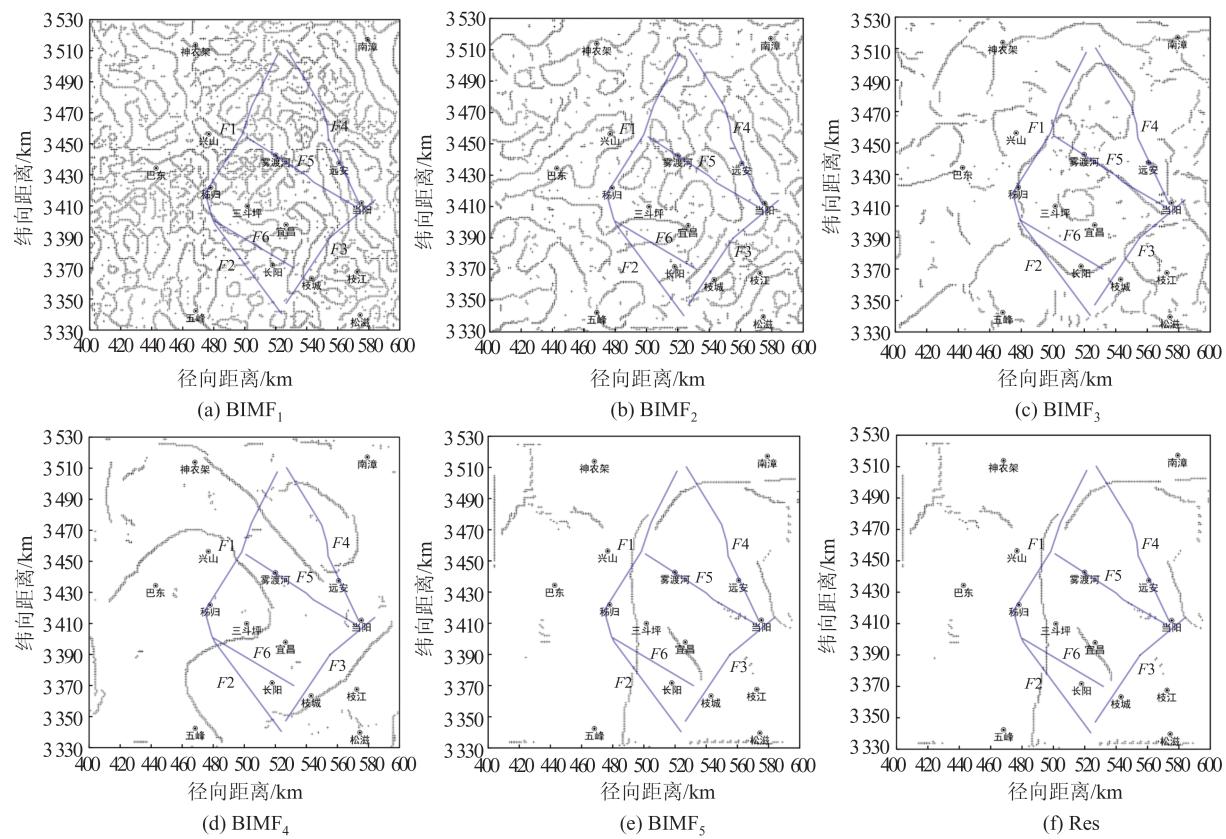
Fig.10 Reconstruction Bouguer Anomalies in Study Area by BEMD Method

显,主要存在3处高值异常区域,其中位于中部位置多条条带状高值整体呈现近菱形状,分布范围较广,异常幅值变化达30 mGal。此外,BIMF<sub>3</sub>异常中仍存在一个类似菱形状高值异常,两个异常特征变化存在对应关系,因此该菱形状高值异常应给予关注,可能包含着某类岩性密度变化或地质构造信息。图10(b)中重构区域异常呈现了西低东高的趋势异常形态,测区西部秭归盆地异常幅值变化最小,东南部的江汉平原地区存有最大幅值变化异常,整体上反映了该研究区域较深结晶基底界面或者地层埋深自西向东逐渐减小的起伏变化情况。

此外,研究区域存有的主要地质构造是黄陵背斜,在其周围存在一系列的断裂分布,主要形

成于印支运动时期,主要包括新华断裂、仙女山断裂、渔阳关-土门断裂、远安断裂、雾渡河断裂和天阳坪断裂等,这些断裂形成一个整体近似菱形状的断裂带,控制着区域的地质构造演化过程,其中黄陵背斜的相对隆升以及当阳、秭归等盆地的相对沉降在某种程度上都受到该断裂带演化过程的影响。文献[21]利用布格重力异常进行三维反演,反演结果显示这些断裂构造的切割深度达到了中地壳上部,属于区域性断裂。

由于BEMD分解得到各级固有模态函数是具有实际地质含义的,反映了不同深度层次上场源特性变化信息,本文对三峡地区布格重力异常进行BEMD分解得到各级BIMF和Res,并利用WMM方法对各尺度异常进行边界检测,检测结果见图11。



F1:新华断裂 F2:仙女山断裂 F3:渔阳关-土门断裂 F4:远安断裂 F5:雾渡河断裂 F6:天阳坪断裂

图 11 BEMD 分解各级固有模态函数的小波模极大值边界识别结果

Fig.11 Results of Edge Detection of Bi-dimensional Intrinsic Mode Function at All Levels by WMM Method

由图 11 可知,各尺度下边界检测结果与 BEMD 分解各分量异常特征相关,反映了三峡地区不同深度上的岩体、构造空间展布特征。利用  $BIMF_3$  尺度异常获得的线性构造特征中,在中部位置菱形状的线性构造提取得到的部分线性构造的展布位置与菱形断裂带构造(如新华断裂、渔阳关-土门断裂和雾渡河断裂等)存在对应关系,说明  $BIMF_3$  异常所反映的场源似深度信息与菱形断裂带构造埋藏深度能够较好的吻合,具有一定实际地质含义。然而,利用其余分量异常获得的线性构造与菱形断裂带构造并不存在明显的对应关系,说明上述不同频率的分量异常是埋藏较浅的地质体或地质构造和埋藏较深的地层起伏或基底变化的响应,菱形断裂带场源异常在上述频段内分解分量异常上反映不明显。

同样地,本文利用 WMM 方法对 BEMD 分解重构局部和区域异常进行边界检测,检测结果见图 12。由图 12 可以看出,利用重构和区域局部异常获得的线性构造特征中均包含重构各尺度异常识别出的边界信息,是不同深度层次上的场源

边界信息的综合响应。

因此,联合 BEMD 和 WMM 方法获得了三峡地区不同深度层位上的岩体或构造线性分布特征,实现了位场数据异常多尺度边界检测,且  $BIMF_3$  异常边界检测结果与区域地质构造特征能够较好的吻合,这比单纯地分析二分异常对应的边界检测结果具有更高的分辨率。

## 4 讨论与结论

BEMD 方法能够自适应地实现位场数据的多尺度分离,且分解各尺度异常具有实际地质含义。在位场数据中有噪声干扰的情况下,WMM 方法仍能够清晰、准确地获取地下地质体的边界信息。本文联合 BEMD 和 WMM 方法实现了三峡地区布格重力异常多尺度边界检测,充分发挥了上述两种数据处理方法的优势,对分解各尺度异常对应的不同深度层位上的岩体边界、地质构造线性分布特征进行清晰、准确的刻画,有助于了解地下目标体分布特征,能够对区域构造单元划分、地质填图、矿产资源圈定和结晶基底起伏变化特征等方面研究提供重要参考信息。

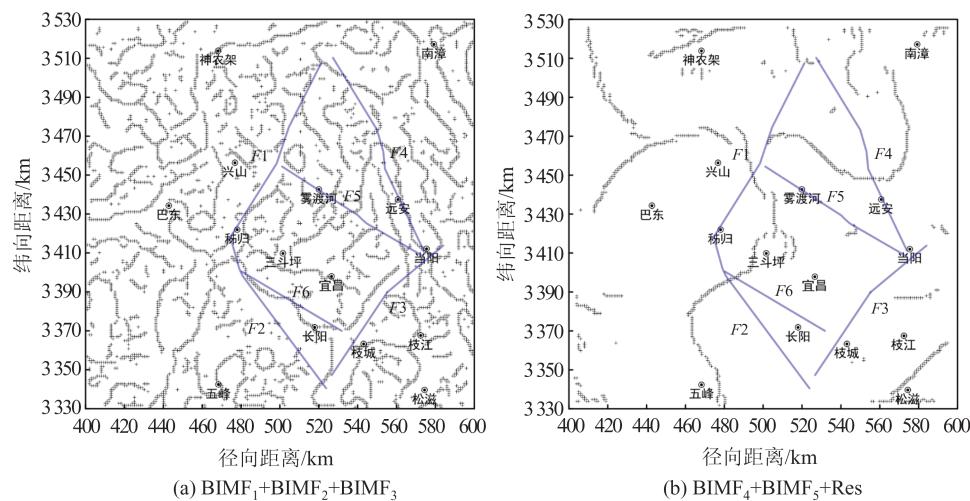


图12 三峡地区布格重力异常BEMD分解重构异常小波模极大值边界识别结果

Fig.12 Results of Edge Detection of the Reconstruction Bouguer Anomalies of BEMD by WMM Method

此外,BEMD方法在位场数据处理中取得了一定的应用效果,但在拓展应用过程中依然存在着一些缺陷和不足,包括边界效应、模态混叠和分解效率较低等问题,如何提高BEMD方法计算效率的同时又能获得较为准确的分解结果需作进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Yi, Zhang Shuangxi, Liang Qing, et al. Application of Boundary Identifying Technologies Using Gravity and Magnetic Maps in Three-Dimensional Geological Mapping of Western Junggar Area [J]. *Earth Science*, 2015, 40(3): 431-440 (张壹, 张双喜, 梁青, 等. 重磁边界识别方法在西准噶尔地区三维地质填图中的应用[J]. 地球科学, 2015, 40(3): 431-440)
- [2] Zhang Shuangxi, Zhang Qingshan, Chen Chao, et al. Edge Detection of Magnetic Bodies Using the Modulus of Magnetic Anomalies [J]. *Geology and Exploration*, 2015, 51(6): 1025-1032 (张双喜, 张青杉, 陈超, 等. 利用磁异常模量进行磁性体边界检测[J]. 地质与勘探, 2015, 51(6): 1025-1032)
- [3] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from Multiscale Edges [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(7): 710-732
- [4] Liu Jinzhao, Wang Tongqing, Chen Zhaohui, et al. Regional and Residual Anomaly Separation Based on Robust 2D Polynomial Fitting with Moving Window [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1478-1482 (刘金钊, 王同庆, 陈兆辉, 等. 利用滑动窗口的多项式拟合算法进行重力位场区域-剩余异常分离[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(10): 1478-1482)
- [5] Liu J Z, Li H L. Separation and Interpretation of Gravity Field Data Based on Two Dimensional Normal Space-Scale Transform (NSST2D) Algorithm: A Case Study of Kauring Airborne Gravity Test Site, Western Australia [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2019, 176(6): 2513-2528
- [6] Nunes J C, Bouaoune Y, Delechelle E, et al. Image Analysis by Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(12): 1019-1026
- [7] Nunes J C, Guyot S, Deléchelle E. Texture Analysis Based on Local Analysis of the Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. *Machine Vision and Applications*, 2005, 16(3): 177-188
- [8] Zhang Shuangxi, Chen Chao, Wang Linsong, et al. The Application of Multi-scale Boundary Detection in Potential Field by Wavelet Modulus Maximum Method Based on BEMD [C]//The 1st Annual Meeting of Chinese Geoscience Union (CGU), Zhuhai, Guangdong, China, 2014 (张双喜, 陈超, 王林松, 等. 基于BEMD的小波模极大值方法在位场多尺度边界检测中的应用[C]//第一届中国地球科学联合学术年会, 珠海, 广东, 2014)
- [9] Zhang Shuangxi, Chen Chao, Wang Linsong, et al. The Bidimensional Empirical Mode Decomposition and Its Applications to Denoising and Separation of Potential Field [J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(6): 2855-2862 (张双喜, 陈超, 王林松, 等. 二维经验模态分解及其在位场去噪和分离中的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2855-2862)
- [10] Zhang Shuangxi, Chen Zhaohui, Wang Tongqing, et al. The Extraction of Abnormal Feature of Mobile Gravity in the Sichuan-Yunnan Region Using BE-

- MD Method [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(4): 407–413 (张双喜, 陈兆辉, 王同庆, 等. 利用二维经验模态分解提取川滇地区流动重力异常特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(4): 407–413)
- [11] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903–995
- [12] Huang N E, Shen Z, Long S R. A New View of Nonlinear Water Waves: The Hilbert Spectrum [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1999, 31(1): 417–457
- [13] Nunes J C, Bouaoune Y, Delechelle E, et al. Image Analysis by Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(12): 1019–1026
- [14] Nunes J C, Guyot S, Deléchelle E. Texture Analysis Based on Local Analysis of the Bidimensional Empirical Mode Decomposition [J]. *Machine Vision and Applications*, 2005, 16(3): 177–188
- [15] Ferreira F J F, de Souza J, de S Bongiolo A, et al. Enhancement of the Total Horizontal Gradient of Magnetic Anomalies Using the Tilt Angle [J]. *GEOPHYSICS*, 2013, 78(3): J33–J41
- [16] Li Qiang, Zhao Xu, Cai Jin'an, et al. S-Wave Velocity Structure of Upper and Middle Crust Beneath the Three Gorges Reservoir Dam and Adjacent Region [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2011, 33(1): 39–50 (李强, 赵旭, 蔡晋安, 等. 三峡水库坝址及邻区中上地壳 S 波速度结构[J]. 地震学报, 2011, 33(1): 39–50)
- [17] Wang Kongwei, Zhang Fan, Qiu Dianming. Relation of Huangling Anticline and Landslide Group in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(4): 1142–1154 (王孔伟, 张帆, 邱殿明. 三峡库区黄陵背斜形成机理及与滑坡群关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 1142–1154)
- [18] Wu Haibo, Shen Xuelin, Wang Jie, et al. Three-Dimensional Velocity Structure of Upper Crust in the Three Gorges Reservoir Area Derived from Double-Difference Tomography [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018, 61(7): 2802–2814 (吴海波, 申学林, 王杰, 等. 三峡库区上地壳三维速度结构的双差层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2018, 61(7): 2802–2814)
- [19] Spector A, Grant F S. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data [J]. *GEOPHYSICS*, 1970, 35(2): 293–302
- [20] Bhattacharyya B K, Leu L K. Spectral Analysis of Gravity and Magnetic Anomalies Due to Two-Dimensional Structures [J]. *Geophysics*, 1975, 40(6): 993–1013
- [21] Zhang Yi, Chen Chao, Liang Qing, et al. Density Structure of Upper and Middle Crust in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Earth Science*, 2012, 37(s1): 213–222 (张毅, 陈超, 梁青, 等. 三峡地区中上地壳密度结果[J]. 地球科学, 2012, 37(增刊): 213–222)

## Multi-scale Edge Detection of Potential Field Using the BEMD and WMM Methods

ZHANG Shuangxi<sup>1</sup> LIU Jinzhao<sup>1</sup> ZHANG Pin<sup>1</sup> CHEN Zhaozui<sup>1</sup>

1 The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China

**Abstract:** **Objectives:** Multi - scale boundary information can be obtained using potential field data at different scales, which having an important practical value on account of the tectonic division, geological mapping orebody delineation and the research of crystalline basement. **Methods:** We use the bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) and the wavelet modulus maximum (WMM) methods to obtain the multi-scale boundary detection of potential field data. Firstly, it is shown that the BEMD method can realize the multi-scale decomposition of potential field data, and the anomalies at different scales possess practical geological significance. Secondly, the model test established by this paper shows that WMM method has the ability of resisting the noise interference so as to detect the boundary of the combined model about the

distribution, location and direction clearly and accurately using the gravity anomalies. Finally, this paper also achieves the results of multi-scale decomposition of the Bouguer gravity anomalies in the Three Gorges region by BEMD algorithm, and estimates the approximate depth of the buried source by the radial logarithmic power spectrum of each BIMF (bi-dimensional intrinsic mode function) and residue, and we deal with each BIMF using WMM method so as to obtain the distribution characteristic of the structure and rock mass in different depths. **Results and Conclusions:** The results of boundary detection at all levels are analyzed and explained according to the regional geology structure feature, the advantage and effectiveness of this method is verified in the end.

**Key words:** bi-dimensional empirical mode decomposition; wavelet modulus maximum; potential field; multi-scale edge detection

**First author:** ZHANG Shuangxi, master, specializes in gravity data processing and application. E-mail: shxzhang@cug.edu.cn

**Foundation support:** Combination Project with Monitoring, Prediction and Scientific Research of Earthquake Technology, CEA(3JH-202001104); the National Natural Science Foundation of China (41704084); the Science for Earthquake Resilience(XH20078Y).

**引文格式:** ZHANG Shuangxi, LIU Jinzhao, ZHANG Pin, et al. Multi-scale Edge Detection of Potential Field Using the BEMD and WMM Methods[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4):533-542. DOI:10.13203/j.whugis20200286(张双喜, 刘金钊, 张品, 等. 联合 BEMD 和 WMM 方法实现位场多尺度边界检测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4):533-542. DOI:10.13203/j.whugis20200286)

(上接第 525 页)

surface is established to eliminate the negative anomalies and guarantee the continuous expression of the seafloor topography. Then, the filtering surface is established to solve the over-filtering problem of convex and concave seafloor topographies based on the proposed BCSF correction model. Finally, to further improve the effectiveness of the filtering, adaptive distance threshold is optimized and estimated. To evaluate the performance of the proposed algorithm, the BCSF algorithm is applied to shallow water multibeam bathymetry data. **Results:** The experimental results show that the BCSF algorithm can avoid the over-filtering. The elimination rate of the proposed BCSF algorithm is better than that of the CSF (cloth simulation filtering) algorithm, which decreases from 12.87% to 0.76% for the whole study area and from 15.29% to 1.09% for local study area, respectively. **Conclusions:** Compared with the CUBE (combined uncertainty bathymetry estimation) algorithm, the BCSF algorithm is more easily to implement and can retain more terrain details. Consequently, the BCSF algorithm has strong robustness and application prospects for multibeam bathymetry data.

**Key words:** multi-beam bathymetry; bidirectional cloth simulation filtering; transfer iterative trend surface; adaptive distance threshold

**First author:** YANG Anxiu, PhD, majors in seabed topography survey technology and scientific research. E-mail: skyanganxiu@163.com

**Corresponding author:** WU Ziyin, PhD, professor. E-mail: zyw@vip.163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China (52001189, 41830540, 41930535); Open Foundation of Key Laboratory of Submarine Geosciences, MNR (KLSG2106); SDUST Research Fund (2019TDJH103); Scientific Research Fund of the Second Institute of Oceanography, MNR (JZ1902); National Program on Global Change and Air-Sea Interaction Special Project (GASI-EOGE-01).

**引文格式:** YANG Anxiu, WU Ziyin, YANG Fanlin, et al. An Automatic Filtering Algorithm of Multi-beam Bathymetry Based on Bidirectional Cloth Simulation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(4): 517-525, 542. DOI: 10.13203/j.whugis20190419(杨安秀, 吴自银, 阳凡林, 等. 面向多波束测深数据的双向布料模拟自动滤波算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(4):517-525, 542. DOI:10.13203/j.whugis20190419)