

李冀, 熊晶. 2020. 长江三峡及邻区布格重力异常小波多尺度分解. 地震学报, 42(3): 319–326. doi: [10.11939/jass.20190120](https://doi.org/10.11939/jass.20190120).

Li J., Xiong J. 2020. Multi-scale wavelet decomposition of Bouguer gravity anomaly in Three Gorges and its surrounding regions. *Acta Seismologica Sinica*, 42(3): 319–326. doi: [10.11939/jass.20190120](https://doi.org/10.11939/jass.20190120).

长江三峡及邻区布格重力异常 小波多尺度分解^{*}

李 冀^{1,2), †} 熊 晶^{1,2)}

1) 中国武汉 430071 中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室
2) 中国武汉 430071 武汉地震计量检定与测量工程研究院有限公司

摘要 基于离散小波变换理论, 对长江三峡及邻区的布格重力异常进行多尺度分解, 获取局部场、区域场和1—4阶小波细节。结果显示: 4阶小波细节中, 秦岭—大别造山带东西向正异常与扬子地块和秦岭—大别造山带之间的相互作用相关; $M \geq 3.0$ 地震大多位于区域场东向突出部位, 即2阶和3阶小波细节所反映的负异常区, 另有小部分位于4阶小波细节所反映的黄陵背斜正异常西侧, 这种现象可能与黄陵背斜新构造运动相关。

关键词 布格重力异常 离散小波变换 多尺度重力异常 地壳结构 长江三峡及邻区

doi: [10.11939/jass.20190120](https://doi.org/10.11939/jass.20190120) **中图分类号:** P312.1 **文献标识码:** A

Multi-scale wavelet decomposition of Bouguer gravity anomaly in Three Gorges and its surrounding regions

Li Ji^{1,2), †} Xiong Jing^{1,2)}

1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake

Administration, Wuhan 430071, China

2) Wuhan Earthquake Metrological Verification and Measurement Engineering Research

Institute Co. Ltd, Wuhan 430071, China

Abstract: Based on the theory of discrete wavelet transform, the multi-scale wavelet decomposition of the Bouguer gravity anomaly in Three Gorges and its surrounding regions was investigated in this paper. Correspondingly, we obtained the regional and local anomalies, as well as the first-to-fourth-order wavelet details. The results show that the EW-trending positive anomaly of Qinling-Dabie orogenic belt exists in the fourth-order wavelet details, which may relate to the interaction between Yangtze block and Qinling-Dabie orogenic belt. The earthquakes with $M > 3.0$ mostly occurred at the regional anomaly belt with eastward extrusion, which is shown as the negative anomaly regions in the second- and third-order wavelet details, also west of the positive anomaly region of Huangling anticline in the fourth-order wavelet detail. The earthquakes occurred in the Three Gorges region may relate to the neotectonics of

* 基金项目 中国地震局地震研究所基本科研业务费专项和中国地震局地壳应力
研究所基本科研业务费专项 (IS201626262) 资助。

收稿日期 2019-07-12 收到初稿, 2019-10-28 决定采用修改稿。

† 通信作者 e-mail: lij20100727@163.com



the Huangling anticline.

Key words: Bouguer gravity anomaly; discrete wavelet transform; multi-scale gravity anomaly; crustal structure; Three Gorges and its surrounding regions

引言

布格重力异常是地壳厚度变化和地壳内部物质不均匀性的综合反映(王谦身, 杜新社, 1997; 张训华等, 2010), 将布格重力异常进行有效分解, 获取区域场和局部场或不同尺度的重力异常信息, 是揭示地壳内部不均匀性进而分析地壳密度结构和密度界面起伏的重要方法。离散小波变换(Mallat, 1989)作为分析解释布格重力异常的最有效方法之一, 广泛应用于中国大陆典型构造运动活跃地区的地壳岩石层结构研究(杨文采等, 2001, 2015; 张训华等, 2010; Jiang *et al.*, 2012; Xuan *et al.*, 2016)。杨文采等(2001)详细介绍了离散小波变换在重力异常分解中的应用, 并进一步根据数据的空间分辨率给出了小波细节与所反映场源深度的关系(杨文采等, 2015); Jiang 等(2012)基于川滇地区布格重力异常的1—4阶小波细节分析了该地区的地壳结构特征, 并利用4阶小波逼近反演了莫霍面深度; Xuan 等(2016)亦采用1—4阶小波细节和4阶小波逼近对青藏高原东向挤压以及川滇地块顺时针旋转进行了解释。

长江三峡位于秦岭一大别造山带与扬子地块衔接的转换地带, 著名的南北重力梯度带(殷秀华等, 1980)纵贯其全境, 所以长江三峡长期以来一直是研究中国大陆东西向和南北向构造分区的重要地区。研究人员利用三峡重力资料获取了该地区的地壳结构, 并基于此对地壳结构与构造运动的关系予以分析(李安然等, 1987; 王石任等, 1992; 张毅等, 2012), 但多尺度重力异常所揭示的构造涵义方面少有报道。为此, 本文拟采用离散小波变换方法对长江三峡及邻区的布格重力异常进行多尺度分解, 以期通过多尺度重力异常揭示地壳结构特征及其构造意义。

1 构造背景

本文研究区域位于中国大陆构造南北分区与东西分区的结合地带。从地形上看, 研究区域基本以 111.5°E 为界, 西部为拱形隆起区, 东部为江汉盆地, 东西分区较为显著(图1)。北部属秦岭一大别造山带, 断裂以NNW向为主, 西部青峰断裂以南以NE向为主, 中部和北部则以NW和WNW向断裂为主。青峰断裂、白河—谷城断裂和长江为研究区域内较明显的构造分区边界, 四川盆地顺时针旋转而向东挤压, 从而在宜昌附近形成了黄陵背斜(王军等, 2010)。二十世纪以来 $M>3.0$ 地震

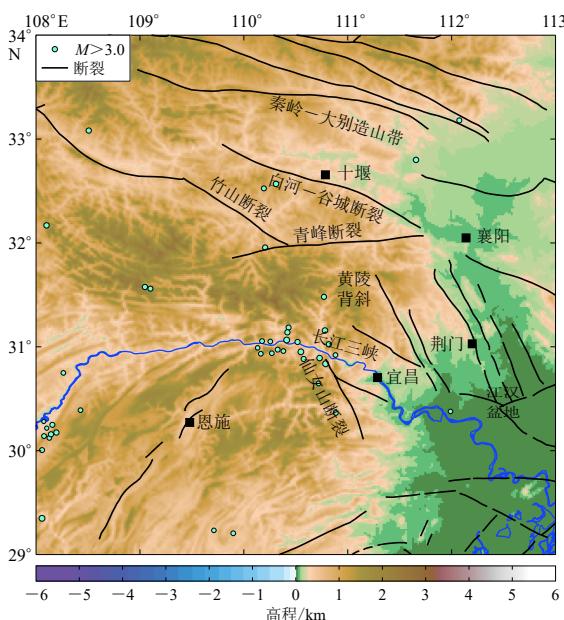


图 1 研究区域构造背景

Fig. 1 Tectonic settings of the studied area

大多分布于长江沿线的居里面凹陷区(梁学堂等, 2015), 即黄陵背斜的西侧。江汉平原表现为大面积升降运动的新构造运动(虞廷林等, 1992; 张德厚, 1994; 李细光, 姚运生, 2004), 具有克拉通盆地的基本特征, 北部边缘逆冲推覆作用显著(江世俊, 李美美, 1992)。从地壳厚度上看, 鄂西三峡地区的莫霍面深度在40 km以上(汪健等, 2014; 何凯等, 2018), 而江汉平原地区仅为30 km左右, 形成了莫霍面周边凹陷、东部隆起的格局。

2 数据和方法

2.1 布格重力异常

本文采用的布格重力异常数据来自于国际重力测量局(Bureau Gravimétrique International, 缩写为BGI), 是基于全球重力场模型EGM 2008(Pavlis et al., 2008)计算获得的高精度全球布格重力异常(图2), 其中地形改正采用ETOPO1地形数据, 地形效应的计算半径为167 km, 地壳密度采用2670 kg/m³。由图2可见: 研究区的布格重力异常在 -190×10^{-5} — 0 m/s^2 之间, 负异常绝对值呈西高东低的基本趋势, 体现了西部山地向东部平原转换的基本特征; 鄂西地区负异常绝对值达 $100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$; 沿西北的十堰向南东的宜昌方向, 再往南的狭长条带即为我国著名的南北重力梯度带的中段地区, 其布格重力异常值为 -100×10^{-5} — $50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$; 以武汉为中心的江汉平原, 其布格重力异常值最低, 负异常绝对值基本在 $50 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 以下。

2.2 离散小波变换

根据尺度和频移参数 a 和 b 定义小波基为(Mallat, 1989)

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (1)$$

基于式(1), 重力信号 $g(x)$ 的小波变换可表示为(杨文采等, 2001)

$$w(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx. \quad (2)$$

如果式(2)中 $g(x)$ 取离散值, 则为离散小波变换, 该变换可应用于规则网格位场数据的分解与重构。Xuan等(2016)给出了第 j 阶离散小波变换中分解与重构的基本原理, 即第 j 阶小波逼近 A_j 可以分解为第 $j+1$ 阶小波逼近 A_{j+1} 以及第 $j+1$ 阶小波细节 D_{j+1} 的横向、垂向和对角成分。若将布格重力异常 Δg_B 进行 n 阶小波分解, 其可表示为小波细节和小波逼近的组合

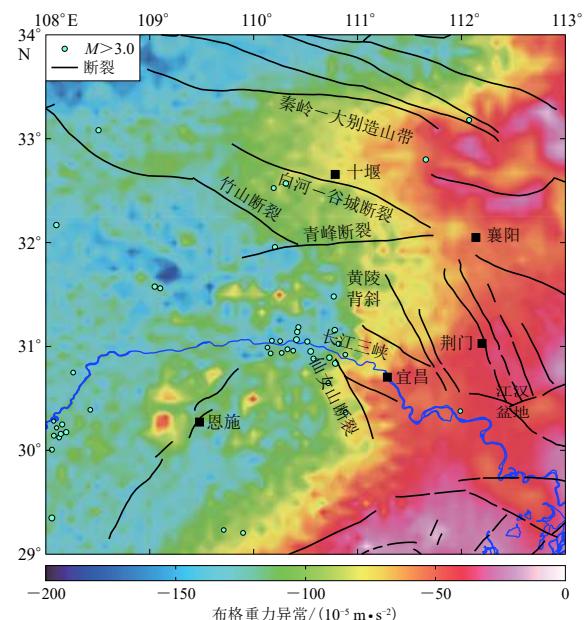


图2 三峡及邻区布格重力异常

Fig. 2 Bouguer gravity anomalies in Three Gorges and its surrounding regions

(杨文采等, 2001; Xuan *et al*, 2016), 即

$$\Delta g_B = A_n + \sum_{i=1}^n D_i, \quad (3)$$

式中, A_n 为 Δg_B 的第 n 阶小波逼近, D_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为 Δg_B 的第 $1-n$ 阶小波细节.

对重力异常进行小波多尺度分解，可获得不同尺度的重力异常特征。因小波变换具有低阶细节不变性(杨文采等, 2001)，因此将布格重力异常进行多阶分解后，可组合低阶细节作为局部场，相应的逼近作为区域场，亦可通过多尺度重力异常分析研究地壳结构的分层特征。

3 结果

本文所采用数据的空间分辨率为 $5' \times 5'$ (约 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$)。根据小波分解阶次与重力异常波长的关系(杨文采等, 2001), 1—4阶小波细节反映了波长约为20, 40, 80和160 km时的重力异常信息。根据杨文采等(2015)基于小波分解阶次和空间分辨率估计场源深度的经验公式, 近似得到1—4阶小波细节所对应的场源深度分别约为6, 12, 24, 48 km, 分别与近地表、上地壳、中地壳和下地壳的密度异常相对应(杨文采等, 2001, 2015; Jiang *et al.*, 2012; Xuan *et al.*, 2016), 4阶小波逼近则反映了160 km以上波长的重力异常, 主要对应于莫霍面密度界面的起伏(Xuan *et al.*, 2016)。

3.1 重力异常局部场与区域场

据杨文采等(2001)及相关研究结果(张训华等, 2010; Jiang *et al*, 2012; Xuan *et al*, 2016),本文使用布格重力异常1—4阶小波细节之和作为局部场, 4阶小波逼近作为区域场, 三峡及邻区的布格重力异常结果如图3所示.

由图3a可见,研究区域的重力异常具有分区、分块特征:布格重力异常局部场的显著正

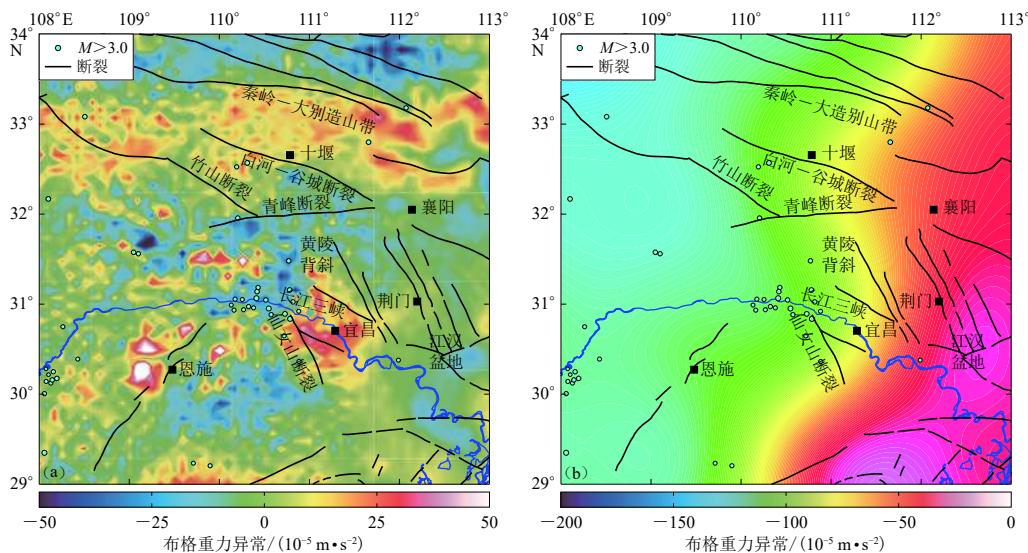


图3 三峡及邻区的布格重力异常局部场(a)和区域场(b)

Fig. 3 Regional field (a) and local field (b) of Bouguer gravities anomalies in Three Gorges and its surrounding regions

异常分布于青峰断裂以北的秦岭一大别造山带, 基本以东西向为主; 黄陵背斜以南、仙女山断裂以东、江汉盆地以西亦存在较为明显的局部正异常; 显著的负异常分布于秦岭一大别造山带以北地区。由图3b可见: 布格重力异常区域场的异常幅值西高东低, 呈东西分区的特点; 南北重力梯度带(殷秀华等, 1980)在该区内的成像由北向南呈现由NNE转向NNW再转向NNE的S型分布, 相较于布格重力异常图(图2)更为明显; 西部负异常达 $-100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 具有明显的山区过渡补偿特点; 东部地区大致以武汉为中心形成近东西向低值区, 周边则较高, 随州以北形成局部高值区。

将布格重力异常4阶小波逼近与Crust1.0模型获得的莫霍面深度进行线性和相关性分析(图4), 可由4阶小波逼近近似获得莫霍面深度, 关系式为 $H_{\text{Moho}} = 30.673 - 0.073\Delta g_B$, 两者相关系数 R 为-0.83, 相关性较强, 因此可以认为4阶小波逼近基本反映了莫霍面的深度分布。

3.2 多尺度重力异常

图5给出了三峡地区布格重力异常的1—4阶小波细节, 可见: 布格重力异常1阶小波细节(图5a)以白河—谷城断裂以南的局部高频信息为主要特征, 与地形起伏变化(图1)密切相关; 布格重力异常2阶小波细节(图5b)显示白河—谷城断裂和青峰断裂以正异常为主, 两断裂之间地区则呈现为近东西向负异常, 沿仙女山断裂的正异常基本呈北西走向, 长江以北正异常的走向由NNW向转为近EW向, 长江沿线的 $M > 3.0$ 地震基本位于负异常区内, 长江以南地区的正负异常分布较为复杂; 布格重力异常3阶小波细节(图5c)显示以长江两侧的局部异常最为显著, 北侧为近EW向的正异常, 黄陵背斜和仙女山断裂均存在明显的南北向正异常, 长江沿线的 $M > 3.0$ 地震明显位于负异常区内, 秦岭一大别造山带附近的异常不明显; 布格重力异常4阶小波细节(图5d)与构造单元和断裂紧密相关, 秦岭一大别造山带呈现较为明显的东西向正异常, 青峰断裂南侧为负异常, 黄陵背斜、仙女山断裂和江汉盆地围限了明显的正异常区, 其中黄陵背斜处于正负异常的梯度带, 江汉盆地呈负异常, 而仙女山断裂亦位于NE向正异常与SW向负异常转换的梯度带上。

4 讨论与结论

一般而言, 布格重力局部场(包括1—4阶小波细节)的正异常揭示的是地壳中的高密度异常体, 负异常反映的是低密度异常体; 而布格重力区域场异常则体现了地壳、岩石层密度

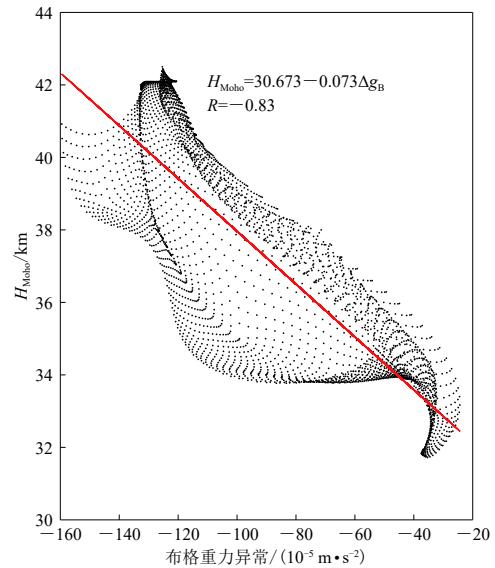


图4 布格重力异常4阶小波逼近与
莫霍面深度 H_{Moho} 的相关性

Fig. 4 Correlation between the fourth-order
wavelet approximation of the Bouguer
gravity anomaly and the Moho depth H_{Moho}

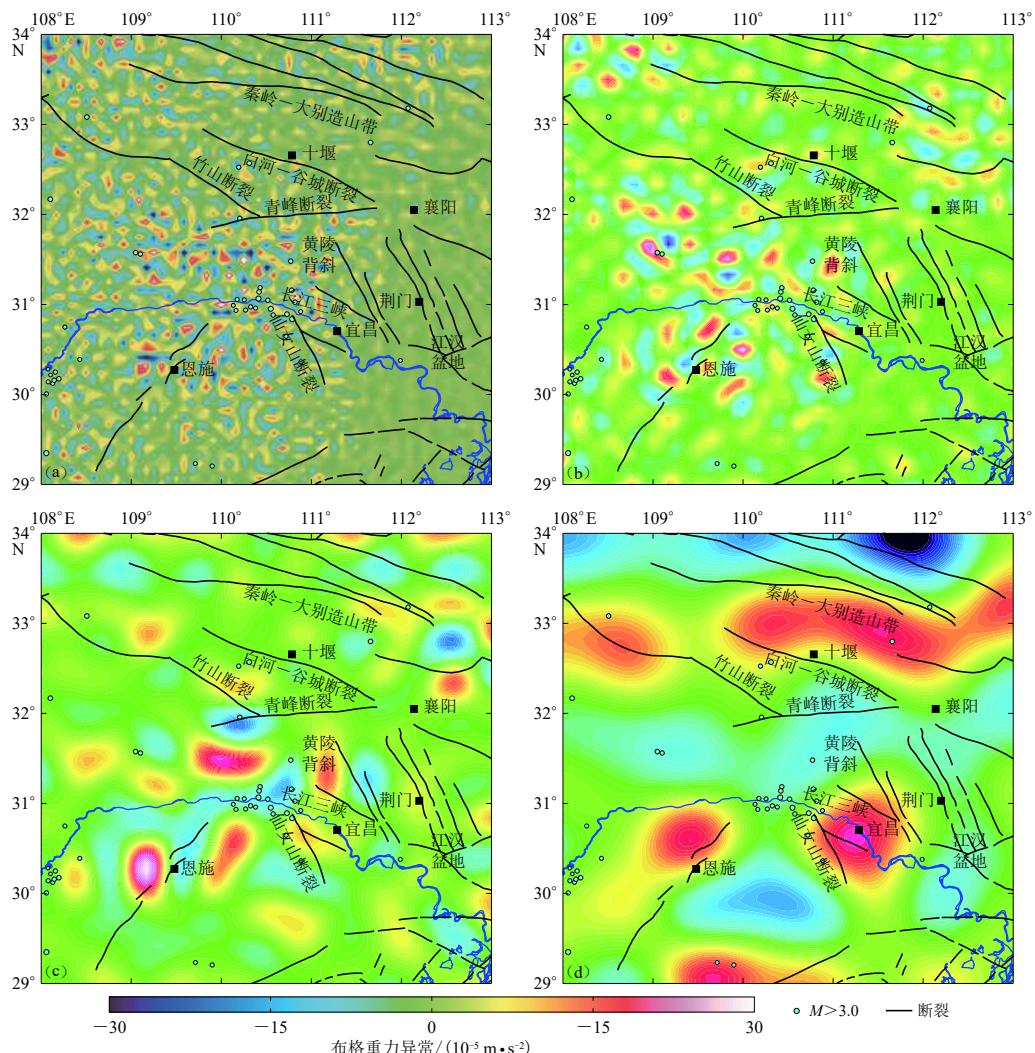


图 5 长江三峡及邻区布格重力异常 1—4 阶小波细节

(a) 1 阶; (b) 2 阶; (c) 3 阶; (d) 4 阶

Fig. 5 The first-to-fourth order wavelet details of Bouguer gravity anomaly in Three Gorges and its surrounding regions

(a) The first-order; (b) The second-order; (c) The third-order; (d) The fourth-order

界面的起伏。根据重力异常功率谱和分解阶次与场源深度存在的对应关系(杨文采等, 2001, 2015), 1 阶小波细节(图 5a)对应于近地表的高频信息, 2—4 阶小波细节(图 5b-d)分别对应于上、中和下地壳的密度异常体, 4 阶小波逼近(图 4)对应于莫霍面起伏。

远震接收函数显示江汉盆地为莫霍面隆起区(何凯等, 2018), 在布格重力异常区域场(图 3b)则呈现为较低的负异常, 地磁结果揭示了该地区的居里面凹陷(梁学堂等, 2015)与俯冲板块边缘莫霍面和居里面的特征基本一致。秦岭一大别造山带 4 阶小波细节(图 5d)的正异常部分, 是在扬子板块北缘下地壳向北楔入南秦岭下地壳的过程中(梁学堂等, 2015)边界地带地壳增厚、物质累积、密度增大的结果。十堰—襄阳—武汉—黄石一线的青峰断裂附近

的负异常北向弧状分布, 可能与扬子地块与秦岭一大别造山带之间相互作用(李细光, 姚运生, 2004)以及中下地壳物质北向运移的响应相关, 也可能是四川盆地顺时针旋转造成的挤压所致。

长江三峡和黄陵背斜的布格重力异常区域场向东突出(图3b), 3阶小波细节却表现为NS向正异常(图5c), 而反映下地壳结构的4阶小波细节在黄陵背斜地区表现为正负异常突变(图5d), 这可能是在四川盆地顺时针旋转的挤压作用下(王军等, 2010)黄陵背斜地区中地壳厚度增加(汪健等, 2014)或物质汇聚、下地壳物质交换的结果。长江沿线地震基本分布在高值负异常向东突出的部位(图3b), 即黄陵背斜西侧以及2阶和3阶细节所反映的负异常地区(图5b, c), 这种现象可能与黄陵背斜新构造运动相关。

参 考 文 献

- 何凯, 杜瑞林, 董彦君, 魏贵春, 申学林, 戴苗. 2018. 利用远震接收函数研究湖北地区地壳结构[J]. 大地测量与地球动力学, 38(6): 646–649.
- He K, Du R L, Dong Y J, Wei G C, Shen X L, Dai M. 2018. Crustal structure and Poisson ratio beneath Hubei Province derived from teleseismic receiver functions[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 38(6): 646–649 (in Chinese).
- 江世俊, 李美美. 1992. 关于湖北省及邻区几个地质构造问题讨论[J]. 湖北地质, 6(1): 23–37.
- Jiang S J, Li M M. 1992. Discussion on some problems of geological structures in Hubei Province and its adjacent areas[J]. *Hubei Geology*, 6(1): 23–37 (in Chinese).
- 李安然, 韩晓光, 徐永键. 1987. 鄂西三峡区域重力场特征及其地震构造意义[J]. 地震地质, 9(3): 71–78.
- Li A R, Han X G, Xu Y J. 1987. Characteristics of gravity field in the Three-Gorge region, western Hubei Province and its seismotectonic significance[J]. *Seismology and Geology*, 9(3): 71–78 (in Chinese).
- 李细光, 姚运生. 2004. 鄂北、豫南现今构造应力场研究[J]. 湖北地矿, 18(2): 4–8.
- Li X G, Yao Y S. 2004. The study on the current stress field in the area between Hubei and Henan[J]. *Hubei Geology & Resources*, 18(2): 4–8 (in Chinese).
- 梁学堂, 刘磊, 李义, 吴军, 楚德亮, 张海强. 2015. 湖北省居里面特征与干热岩分布预测[J]. 资源环境与工程, 29(6): 999–1005.
- Liang X T, Liu L, Li Y, Wu J, Chu D L, Zhang H Q. 2015. Characteristics of Curie depth interface and distribution forecast of hot dry rock in Hubei Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 29(6): 999–1005 (in Chinese).
- 王军, 褚杨, 林伟, 王清晨. 2010. 黄陵背斜的构造几何形态及其成因探讨[J]. 地质科学, 45(3): 615–625.
- Wang J, Chu Y, Lin W, Wang Q C. 2010. Structural geometry and the origin of the Huangling anticline[J]. *Chinese Journal of Geology*, 45(3): 615–625 (in Chinese).
- 汪健, 申重阳, 李辉, 孙少安, 邢乐林. 2014. 三峡地区壳幔深部界面重力反演[J]. 地震学报, 36(1): 70–83.
- Wang J, Shen C Y, Li H, Sun S A, Xing L L. 2014. Gravity inversion for deep crust-mantle interface in Three Gorges region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 36(1): 70–83 (in Chinese).
- 王谦身, 杜新社. 1997. 分层重力图像方法及其应用[J]. 地球物理学报, 40(5): 649–659.
- Wang Q S, Du X S. 1997. Stratified gravity image and its application[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 40(5): 649–659 (in Chinese).
- 王石任, 朱思林, 李蓉川. 1992. 长江三峡地区三维重力反演研究[J]. 地球物理学报, 35(1): 69–76.
- Wang S R, Zhu S L, Li R C. 1992. Three dimensional inversion of gravity anomalies in the region of Three Gorges, the Yangtze River[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 35(1): 69–76 (in Chinese).
- 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 程振炎. 2001. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报, 44(4): 534–541.
- Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z, Cheng Z Y. 2001. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(4): 534–541 (in Chinese).
- 杨文采, 孙艳云, 侯遵泽, 于常青. 2015. 用于区域重力场定量解释的多尺度刻痕分析方法[J]. 地球物理学报, 58(2):

520–531.

- Yang W C, Sun Y Y, Hou Z Z, Yu C Q. 2015. An multi-scale scratch analysis method for quantitative interpretation of regional gravity fields[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(2): 520–531 (in Chinese).
- 殷秀华, 史志宏, 刘占坡, 张玉梅. 1980. 中国大陆区域重力场的基本特征[J]. 地震地质, **2**(4): 69–75.
- Yin X H, Shi Z H, Liu Z P, Zhang Y M. 1980. The basic features of regional gravity field in Chinese continent[J]. *Seismology and Geology*, **2**(4): 69–75 (in Chinese).
- 虞廷林, 施顺英, 蒋跃. 1992. 湖北省现代地壳垂直形变图编制与解释[J]. 地壳形变与地震, **12**(2): 74–78.
- Yu T L, Shi S Y, Jiang Y. 1992. Compilation and explanation on the modern vertical crustal deformation map in Hubei Province[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **12**(2): 74–78 (in Chinese).
- 张德厚. 1994. 江汉盆地新构造与第四纪环境变迁 [J]. 地壳形变与地震, **14**(1): 74–80.
- Zhang D H. 1994. Neotectonics and Quaternary environmental changes in Jianghan basin[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **14**(1): 74–80 (in Chinese).
- 张训华, 郭兴伟, 杨金玉, 温珍河, 侯方辉. 2010. 中国及邻区重力特征与块体构造单元初划[J]. *中国地质*, **37**(4): 881–887.
- Zhang X H, Guo X W, Yang J Y, Wen Z H, Hou F H. 2010. Gravity characteristics and preliminary division of tectonic units in China and adjacent areas[J]. *Geology in China*, **37**(4): 881–887 (in Chinese).
- 张毅, 陈超, 梁青, 王林松, 杜劲松, 刘圣博. 2012. 三峡地区中上地壳密度结构[J]. 地球科学, **37**(增刊): 213–222.
- Zhang Y, Chen C, Liang Q, Wang L S, Du J S, Liu S B. 2012. Density structure of upper and middle crust in Three Gorges Reservoir area[J]. *Earth Science*, **37**(S): 213–222 (in Chinese).
- Jiang W L, Zhang J F, Tian T, Wang X. 2012. Crustal structure of Chuan-Dian region derived from gravity data and its tectonic implications[J]. *Phys Earth Planet Int*, **212/213**: 76–87.
- Mallat S G. 1989. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. *IEEE Trans Patt Anal Mach Intell*, **11**(7): 674–693.
- Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, Factor J K. 2008. An Earth gravitational model to degree 2160[C]//*Proceedings of the 2008 General Assembly of the European Geosciences Union*. Vienna: European Geosciences Union.
- Xuan S B, Shen C Y, Li H, Tan H B. 2016. Structural interpretation of the Chuan-Dian block and surrounding regions using discrete wavelet transform[J]. *Int J Earth Sci*, **105**(5): 1591–1602.