

张永奇, 韩美涛, 张恩会, 等. 2022. 渭河盆地及邻区重力异常小波多尺度分解与解释[J]. 地震研究, 45(1): 75–87, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0009.

Zhang Y Q, Han M T, Zhang E H, et al. 2022. Multi-scale wavelet decomposition and interpretation of gravity anomalies in the Weihe Basin and Its adjacent areas [J]. *Journal of Seismological Research*, 45(1): 75–87, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0009.

渭河盆地及邻区重力异常小波多尺度分解与解释*

张永奇^{1,2}, 韩美涛², 张恩会², 郑增记², 曹建平², 宋普伟²

(1. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘要: 基于 EGM2008 重力场模型计算获得了渭河盆地及邻区布格重力异常。采用小波多尺度分解方法对布格重力异常进行了 4 阶小波逼近和小波细节分解, 同时基于平均径向对数功率谱方法定量化地计算出 1~4 阶小波细节和小波逼近所对应的场源平均埋深。结合区域地质和地震资料, 对获得的重力场结果进行分析, 得到如下结论: ①鄂尔多斯地块、渭河盆地、秦岭造山带 3 个一级构造单元的布格重力异常之间存在明显差异; 构造区内部重力异常也存在横向的显著差异。布格重力异常的走向、规模、分布特征与二级构造区及主要的断裂具有一定的对应关系。②渭河盆地及邻区布格重力异常 1~4 阶细节对应 4~23 km 不同深度的场源信息, 鄂尔多斯地块南缘东、西部的地壳结构存在明显的差异; 渭河盆地凹陷、凸起构造区边界清晰, 断裂边界与重力异常边界具有较好的一致性; 秦岭造山带重力异常连贯性不好, 东、西部重力异常变化特征表现出明显的差异。③渭河盆地及邻区布格重力异常分布与莫霍面埋深具有非常明显的镜像关系。渭河盆地及邻区地震主要分布在六盘山—陇县—宝鸡断裂带、渭河断裂与渭南塬前断裂交汇处、韩城断裂与双泉—临猗断裂交汇处。渭河盆地及邻区重力异常主要由中上地壳剩余密度体所影响, 这可能是该区地震以浅源地震为主的主要原因。

关键词: 渭河盆地及邻区; 布格重力异常; 小波多尺度分解; 莫霍面深度

中图分类号: P315.726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)01-0075-13

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0009

0 引言

印度板块向欧亚板块持续俯冲, 导致青藏高原的隆升和周缘一系列新生代盆地的形成 (Molnar, Tapponnier, 1975; Peltzer, Tapponnier, 1988)。青藏高原隆升挤压的应力不断向 NE 方向传递, 在秦岭山前形成大型左旋走滑断层而导致华北板块受到 NW—SE 向拉张, 由此形成渭河盆地 (Peltzer et al., 1985)。渭河盆地被鄂尔多斯地块与秦岭造山带所夹持, 为近 EW 走向的断陷盆地, 地层系统分属华北和秦岭两大地层区 (刘良志等, 2018)。受构造运动的影响, 盆地内活动断裂发育, 形成了多条横贯盆地的大断裂, 这些断

裂不仅对渭河盆地构造体系具有控制作用, 还对区域地震的孕育发生具有调节、诱发作用。针对各条主要断裂不少学者作了大量的研究工作, 取得了不少研究成果 (雷姚琪, 张安良, 1985; 韩恒悦等, 1987; 李永善, 1992; 冯希杰, 戴王强, 2004; 师亚芹等, 2008; 李晓妮等, 2012)。渭河盆地及邻区历史上曾发生过多次 7 级以上大震, 尤其是 1556 年发生在陕西华县的 8¼ 级特大地震, 是我国有史以来造成死亡人数最多的一次地震事件 (原廷宏, 冯希杰, 2010)。

在地质构造演化过程中, 深部的岩浆活动对岩石圈结构的横向非均匀性具有重要影响, 导致地壳内部、上地幔的物质分布及密度等物性存在显著差异, 在地球物理特性上表现为布格重力异

* 收稿日期: 2021-06-09.

基金项目: 陕西省地震局启创基金课题 (QC202013)、陕西省自然科学基金基础研究计划——青年项目 (2021JQ-962、2021JQ-980) 和中国地震局“三结合”提升性课题 (3JH-201902006) 联合资助。

第一作者简介: 张永奇 (1985-), 工程师, 主要从事基于大地测量数据的地壳形变正反演研究。

E-mail: zyq19851115@163.com.

常 (庞卫东等, 2014)。布格重力异常反映的是地下不同深度、不同规模和不同密度地质异常体的重力异常总效应, 它既体现了地质体的纵向分层, 也体现了地壳介质的横向密度非均匀性。因此研究重力异常场就可以揭示区域地壳、上地幔结构及介质密度变化, 甚至是区域地震活动性。

目前针对渭河盆地的地壳结构及介质密度变化有很多研究成果, 已有研究采用的技术手段大多是基于地震学、地质学、大地测量学 (张少泉等, 1985; 丁韞玉等, 2000; 任隽等, 2012; 冯红武等, 2019; 张永奇等, 2021), 而利用重力资料开展的研究相对较少 (刘良志等, 2018; 任泉等, 2012; 王谦身等, 2015; 路利春等, 2017)。此外, 以往的研究只涉及渭河盆地的局部地区, 大区域研究相对较少。基于上述原因, 有必要对渭河盆地及邻区的大区域范围地壳结构特征开展针对性的研究。本文基于高精度重力场 EGM2008 重力模型数据, 采用小波多尺度分解方法对布格重力数据进行处理, 并利用径向对数功率谱方法计算小波逼近和小波细节对应的近似场源深度。在此基础上, 结合区域莫霍面埋深、地质资料及地震资料对渭河盆地及邻区的地质构造、地壳结构及地震风险性等进行研究, 目的是进一步深化对渭河盆地及邻区地质构造的认识以及为该地区地震风险研判提供技术支撑和参考依据。

1 研究方法

小波多尺度分解方法凭借其明显的技术优势已被应用到众多研究领域, 在地球科学领域如重力异常场分解研究中也得到广泛的应用 (侯遵泽, 杨文采, 1997; 杨文采等, 2001; 方盛明等, 2002; 楼海, 王椿镛, 2005; 姜文亮, 张景发, 2012; 徐志萍等, 2015; 李洋洋等, 2020)。基于小波多尺度分解方法可将重力异常场分解为逼近场和细节场, 其中逼近场是区域布格重力异常信息的反映, 主要体现了深部场源所引起的较大规模的低频异常信息; 细节场是局部布格重力异常信息的反映, 主要体现了浅部场源体引起的较小规模的高频异常信息。上述细节场中低阶细节代表浅源地质体异常, 高阶细节代表深源地质体异常 (徐志萍等, 2015)。小波多尺度分析方法的基本表述为: 对于分辨率为 2^{-j} 的信号 $f(x) \in R$, 用

$A_j f(x)$ 表示 V_j 空间的低频逼近部分, $D_j f(x)$ 表示 W_j 空间的高频细节部分, 可得:

$$A_j f(x) = A_{j+1} f(x) + D_{j+1} f(x) \quad (1)$$

可进一步写成:

$$P_{V_0} f(x) = A_N f(x) + \sum_{j=1}^N D_j f(x) \quad (2)$$

式中: $P_{V_0} f(x)$ 表示将函数 $f(x)$ 映射到 V_0 子空间; N 为小波分解的最大阶数。

对于重力异常 $\Delta g(x)$, 假设将其分解到 $N=4$ 的空间, 可简化记为:

$$\Delta g(x) = A_4 G + D_4 G + D_3 G + D_2 G + D_1 G \quad (3)$$

式中: $A_4 G$ 表示四阶小波逼近部分; $D_1 G \sim D_4 G$ 表示 1~4 阶小波细节。

对于二维平面函数, 需采用二维小波变换进行分析, 对于二维重力异常, 同样可以进行小波多尺度分解:

$$\Delta g(x, y) = A_0 f(x, y) = A_4 f(x, y) + \sum_{j=1}^4 [D_j^h f(x, y) + D_j^v(x, y) + D_j^d f(x, y)] \quad (4)$$

式中: $D_j^h f(x, y)$ 、 $D_j^v(x, y)$ 、 $D_j^d f(x, y)$ 分别表示 W_j^2 空间中水平垂直和对角线方向上的高频细节部分 (刘天佑, 2017)。

功率谱是由 Spector 与 Grant (1970) 最早提出的一种重磁场解析处理方法, 在小波多尺度分解的基础上, 采用功率谱分析方法可进行场源近似深度计算。将功率谱分析与小波分析两种方法结合有利于对地壳结构进行更深入、细致、合理的解释 (杨文采等, 2001; 姜文亮, 张景发, 2012; 徐志萍等, 2015; 刁博等, 2008; 侯遵泽等, 2015)。考虑最简单情况下的球体重力异常的波谱, 极坐标下的功率谱表达式为:

$$E(r) = |S(u, v)|^2 = A^2 e^{-2hr} \quad (5)$$

两边取对数可得:

$$\ln E(r) = \ln A^2 - 2hr \quad (6)$$

式中: $\ln E(r)$ 为异常波谱的径向对数功率谱; A 为尺寸系数; r 为圆频率或波数; h 为场源埋深。 $\ln E(r)$ 与径向频率 r 成线性关系, 其直线的斜率为

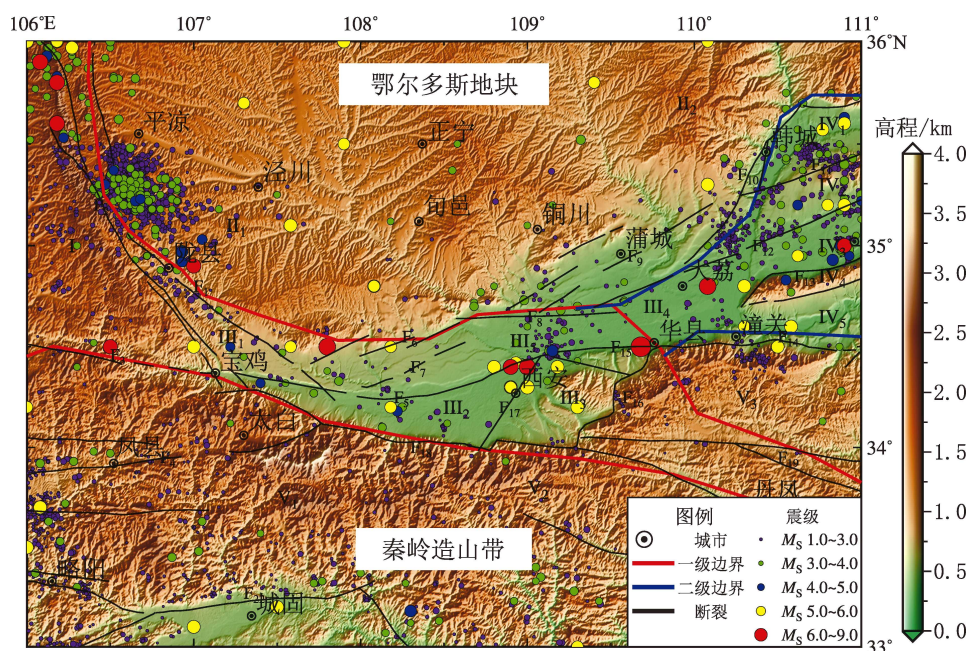
$-2h$, 根据直线的斜率就可以求出场源的埋深为:

$$h = \frac{\ln E(r_1) - \ln E(r_2)}{2(r_1 - r_2)} \quad (7)$$

2 重力资料与数据处理

本文主要研究区域为渭河盆地及邻区 ($33^\circ \sim$

36°N , $106^\circ \sim 111^\circ\text{E}$), 其范围如图 1 所示。本文采用的数据为 EGM2008 重力场模型数据^①, EGM2008 全球重力场模型的球谐系数高达 2 160 阶, 空间分辨率约为 $5' \times 5'$, 该模型可提供波长约为 10 km 的重力异常信息 (Sandwell, Smith, 2009; Pavlis *et al*, 2012)。基于 EGM2008 重力场模型提供的自由空气重力异常, 通过地形改正、高度改正可得到布格重力异常。



F₁: 陇县—岐山—马召断裂; F₂: 六盘山—陇县—宝鸡断裂; F₃: 西秦岭北缘断裂; F₄: 成县—太白断裂; F₅: 渭河断裂; F₆: 北山山前断裂; F₇: 扶风—礼泉断裂; F₈: 口镇—关山断裂; F₉: 富平—蒲城断裂; F₁₀: 韩城断裂; F₁₁: 峨眉台地断裂; F₁₂: 双泉—临猗断裂; F₁₃: 中条山断裂; F₁₄: 华山西麓断裂; F₁₅: 渭南塬前断裂; F₁₆: 华山西麓断裂; F₁₇: 长安—临潼断裂; F₁₈: 秦岭北缘断裂; F₁₉: 铁炉子—栾川—南召断裂; F₂₀: 商县—丹凤断裂; F₂₁: 山阳断裂; F₂₂: 略阳断裂; I: 六盘山构造区; II₁: 鄂尔多斯地块南缘西部; II₂: 鄂尔多斯地块南缘东部; III₁: 宝鸡凸起; III₂: 西安凹陷; III₃: 骊山凸起; III₄: 固原凹陷; III₅: 咸阳—渭南凸起; IV₁: 韩城凹陷; IV₂: 峨眉台地凸起; IV₃: 运城凹陷; IV₄: 中条山凸起; IV₅: 灵宝凹陷; V₁: 秦岭造山带西部; V₂: 秦岭造山带中部; V₃: 秦岭造山带东部

图 1 渭河盆地及邻区地质构造及历史地震分布

Fig. 1 Geological structure and historical earthquakes in the Weihe Basin and its adjacent areas

通过对不同小波基函数进行试算对比, 选择对称性、紧支撑性较好的 Daubechies 小波对渭河盆地及邻区的布格重力异常进行分解 (许家妹等, 2015), 在进行小波多尺度分解的过程中, 观察逼近场变化情况, 当 N 阶与 $N-1$ 阶逼近场变化很小时, 确定 N 为最终分解尺度的最大阶数, 进而将小波分解尺度定为 4 阶 (刁博等, 2007)。本文研究结果显示: 1 阶、2 阶的小波细节分布异常尺度较小; 3 阶、4 阶的小

波细节异常尺度较大, 并呈现出相似的变化特征, 最终得到 1~4 阶小波逼近场和细节场。再根据对数功率谱方法计算 1~4 阶小波逼近场和细节场对应的近似等效场源深度, 同时绘制了径向对数功率谱图 (图 2)。图中横坐标 r 表示频率或波数, 纵坐标 $\ln E(r)$ 表示对应的功率谱。同时统计了小波多尺度分解对应的近似场源深度, 见表 1。

为了更好地解释重力异常横向和纵向的分布特征,

^① <http://icgem.gfz-potsdam.de>.

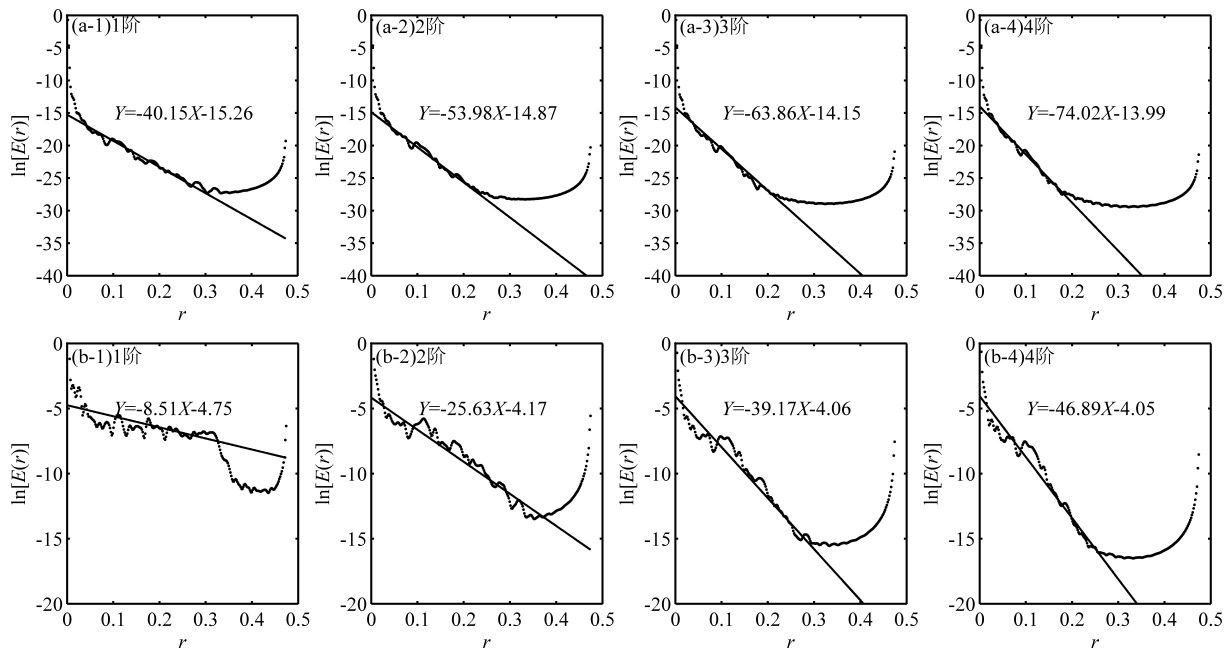


图2 1~4阶小波逼近(a)及小波细节(b)对应的径向功率谱

Fig. 2 The radial power spectrums corresponding to the approximation (a) and details (b) of the 1st, 2nd, 3rd, and 4th order wavelet

表1 小波多尺度分解等效场源深度

Tab. 1 Depths of the equivalent field sources by multi-scale wavelet decomposition

阶次	场源深度/km	阶次	场源深度/km
1阶逼近	20	1阶细节	4
2阶逼近	27	2阶细节	12
3阶逼近	32	3阶细节	20
4阶逼近	37	4阶细节	23

本文根据 Berteussen (1977) 总结的 P 波与密度的经验公式, 计算了不同深度的地壳密度:

$$\rho = 0.77 + 0.32V_p \quad (8)$$

式中: ρ 为根据波速转换后的密度; V_p 为 P 波速度。本文使用的渭河盆地及邻区的地壳厚度、P 波速度等数据根据任隽 (2012) 的研究结果获得, 地壳密度根据式 (8) 计算。

3 重力场特征分析

3.1 自由空气与布格重力异常特征

本文根据 EGM2008 重力场模型计算得到渭河盆地及邻区的自由空气重力异常和布格重力异常

(图3)。从图3a可看出, 渭河盆地及邻区自由空气重力异常表现出明显的地形相关特征。自由空气重力异常在渭河盆地整体以负值变化为主, 其中渭河盆地中段的周至地区为最低值, 约为 -150 mGal, 六盘山构造区显示为正值变化, 最大量值为 60 mGal, 与相邻的西秦岭北缘断裂形成重力梯度带。鄂尔多斯地块南缘的西部地区自由空气重力异常变化平缓, 基本在 0 值附近变化, 在中部的旬邑—正宁地区和东部的黄龙地区出现局部正值变化, 最大量值分别为 20 mGal、 50 mGal。以秦岭北缘断裂及华南山前断裂为界, 秦岭造山带自由空气重力异常整体以正值变化为主, 最大值约为 120 mGal。其中秦岭造山带与渭河盆地之间重力异常变化剧烈, 形成非常显著的重力变化梯度带; 而北缘的商丹缝合带与南部的勉略缝合带之间重力异常变化相对平缓, 此外, 在秦岭造山带盆—岭—山分区特征比较明显。

对研究区自由空气重力异常进行中间层改正和地形改正得到布格重力异常 (图3b), 布格重力异常与地形相关性不强, 但是和莫霍面埋深呈现明显的镜像关系。布格重力异常在六盘山构造区为大范围的负值变化, 尤其是六盘山—陇县—宝鸡断裂带与成县—太白断裂围限的三角形区域

是整个研究区的重力异常低值区, 最小值达到 -240 mGal。鄂尔多斯地块南缘以旬邑—正宁为界, 西部和东部重力异常明显不同, 表明这 2 个地区地壳结构和介质密度存在显著差异。渭河盆地以 109°E 为界, 其西部与东部重力异常在量值上发生明显变化, 究其原因: 一方面可能与其深部地壳结构及介质密度有关, 比如地幔物质的上涌、莫霍面的隆起、岩石密度差异等; 另一方面与受到印度板块 NE 向推挤和太平洋板块 SW 向推挤的远程综合效应影响有关。在渭河盆地的东部从北往南, 韩城断裂、双泉—临猗断裂、中条山断裂、华山西山前断裂等附近出现明显的重力异常变化梯度带, 呈现高值—低值—高值交替出现的变化规律。秦岭造山带重力异常分段、分区特

征明显, 尤其是以长安—临潼断裂为界的西秦岭与中秦岭、东秦岭重力异常差异明显; 以勉略缝合带为界其南、北两侧重力异常差异明显 (王谦身等, 2015)。从图 3b 中还可以识别出研究区主要的构造单元, 如一级构造渭北隆起 (重力异常高值区)、六盘山构造区 (重力异常低值区) 等; 二级构造宝鸡凸起 (重力异常高值区)、西安凹陷 (重力异常低值区)、骊山凸起 (重力异常高值区)、固市凹陷 (重力异常低值区) 等与前人研究结果一致 (刘良志等, 2018; 路利春等, 2017)。但布格重力异常是一个反映不同深部场源信息叠加场, 由于不同信号的相互干扰, 地质构造及断裂分布特征清晰度不够, 需要进行不同深度场源信息的分离。

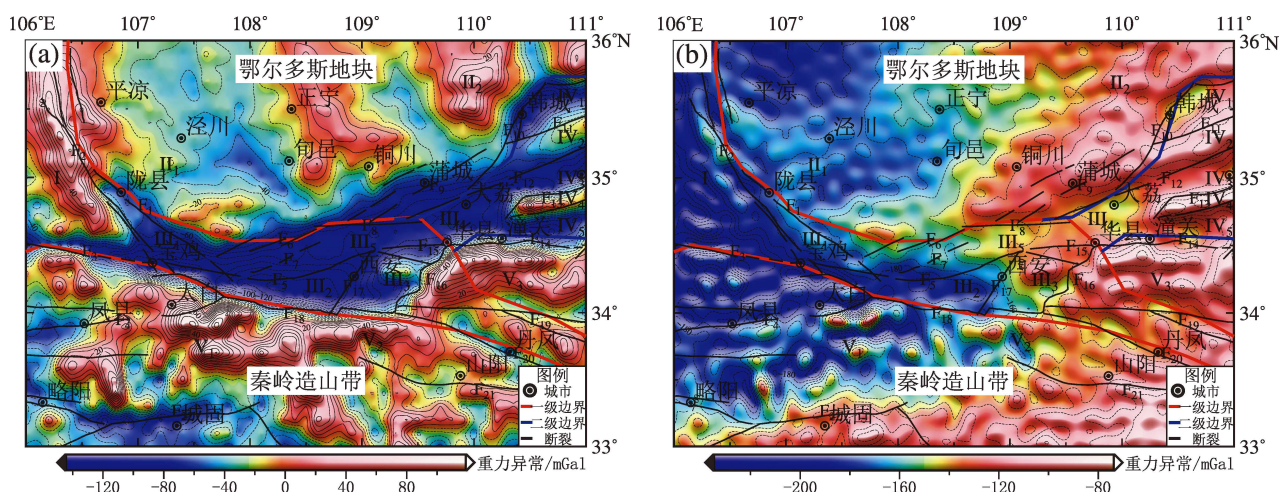


图 3 渭河盆地及邻区自由空气重力异常 (a) 及布格重力异常 (b) (断裂及构造区名称同图 1)

Fig. 3 Gravity anomalies in the Weihe Basin and its adjacent areas (faults and the tectonic region are shown in Fig. 1)

3.2 布格重力异常小波逼近特征

利用小波多尺度分解方法获得研究区 1~4 阶小波逼近 (图 4), 同时计算了 1~4 阶小波逼近对应的近似场源深度 (表 1)。1~4 阶小波逼近对应的等效场源深度在 $20 \sim 37$ km, 重力异常基本反映地是中下地壳、甚至切过下地壳到达上地幔的场源信息 (庞卫东等, 2014; 方盛明等, 2002; 楼海, 王椿镛, 2005)。虽然各阶小波逼近图像中反映的重力场源深度不同, 但都可看出研究区域不同大地构造单元的基本格局 (姜文亮, 张景发, 2012; 徐志萍等, 2015)。随着小波逼近阶数的增加, 不同构造单元及深大断裂的重力异常的浅源、

局部信息得到了较好的抑制, 区域异常信息显得更为突出, 各主要大地构造单元的基本格局及其重力异常分布特征越为明显, 各构造区域分布的重力异常带的走向、形态、梯度变化等特征, 反映出不同区域地质特征的差异性。

以 4 阶小波逼近为例 (图 4d): 以旬邑—乾县—西安一线为界, 重力异常差异的边界呈现出“S”型展布特征。布格重力异常在渭河盆地西部表现为低值区, 由西向东逐渐增大, 由最西端的约 -240 mGal 上升到最东边的约 -100 mGal。六盘山构造区及渭河盆地西部布格重力异常等值线展布与六盘山—陇县—宝鸡断裂及秦岭北缘断裂走

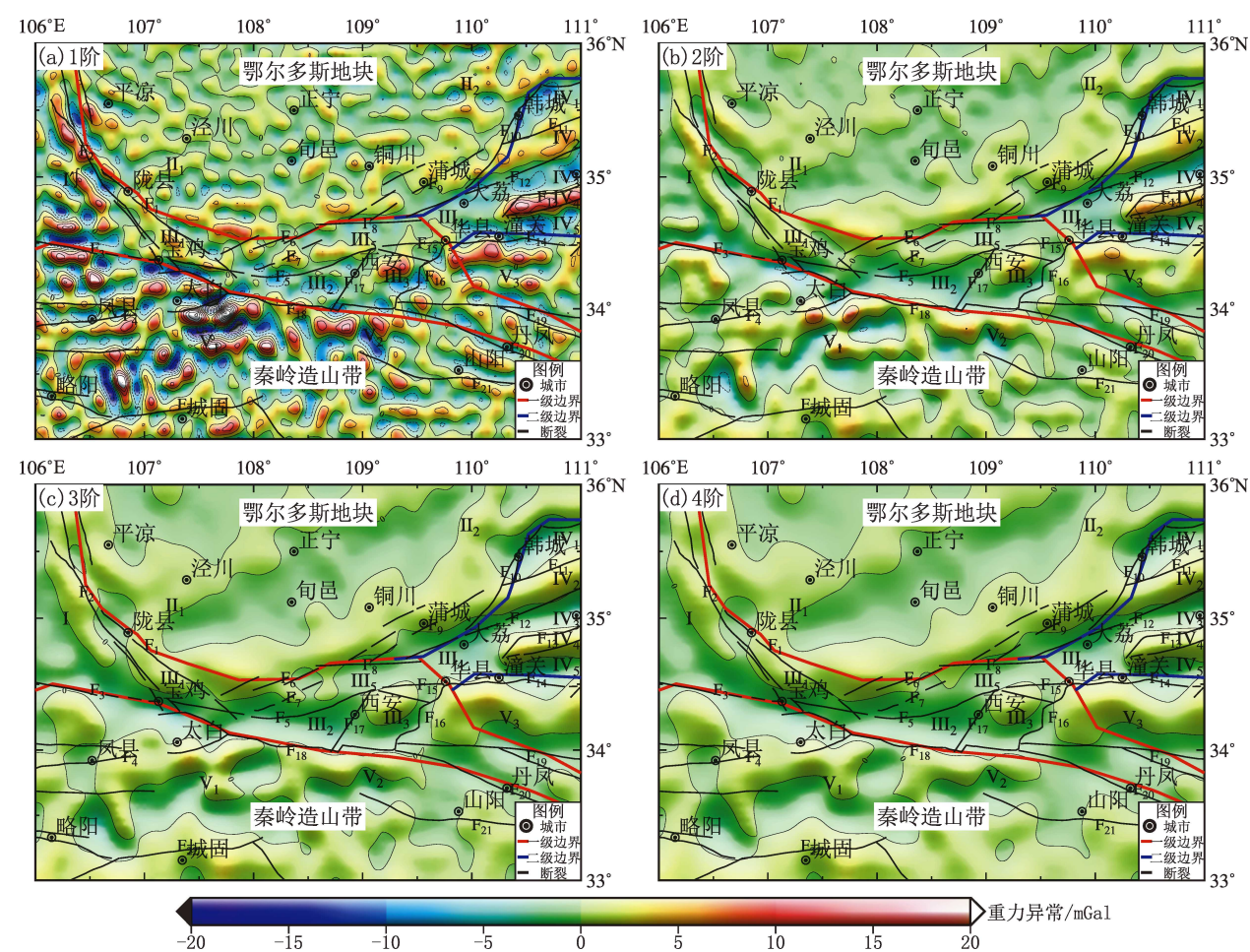


图 5 渭河盆地及邻区小波多尺度分解 1~4 阶细节图（断裂及构造区名称同图 1）

Fig. 5 Detailed multi-scale wavelet decomposition in the Weihe Basin and its adjacent areas (faults and the tectonic region are shown in Fig. 1)

过 4 km，因此基本反映的是沉积盖层的密度体信息。重力异常变化范围为 $-40 \sim 40$ mGal，其分布特征显示出研究区地壳密度横向变化剧烈且比较破碎。以六盘山—陇县—宝鸡断裂带及渭北北山断裂为界，位于鄂尔多斯地块南缘的陕北斜坡及渭北坡地重力异常变化平缓，基本在 $-5 \sim 5$ mGal，呈现出狭长条带状或串珠状分布，且多处伴生正负差异变化较小的重力梯级带；其南部的渭河盆地及秦岭造山带重力异常体规模相对较大，走向基本以 NW、EW、NEE 向为主。重力梯度带差异变化显著，显示出盖层物质横向不均匀性，同时表明上述地区的结晶基底和岩石物性存在差异（刘良志等，2018；路利春等，2017）。

2 阶小波细节（图 5b）显示场源深度约为 12 km，与研究区上地壳深度相接近（表 2），主

表 2 渭河盆地及邻区地壳厚度、P 波速度、密度

Tab. 2 Crustal thickness, P-wave velocity, and density in the Weihe Basin and its adjacent areas

地壳结构	平均厚度/km	$V_p/(km \cdot s^{-1})$	密度/ $(g \cdot cm^{-3})$
沉积层	7	3.45 ~ 4.05	1.87 ~ 2.1
上地壳	13	6.06	2.71
中地壳	11	6.35	2.80
下地壳	3 ~ 4	6.52	2.86
上地幔顶部	—	8.0	3.33

要揭示了上地壳物质密度非均匀的变化，显示出鄂尔多斯地块南缘、渭河盆地及秦岭造山带地壳结构的差异性（李永善，1992；任隽，2012）。重力异常变化范围基本在 $-10 \sim 10$ mGal。相比于 1 阶小波细节，鄂尔多斯地块南缘以及渭北地区重力异常狭窄短促条带及串珠状异常基本消失，表现出明显的规模较大的条带状或块状分布，重力

异常差异变化很小,表明该地区具有较为一致的结晶基底和物性密度。渭河盆地内重力异常条带和块状的规模大幅增加,重力异常的变化差异明显,勾勒出比较明显的断裂分布和构造分区轮廓。渭河盆地内部由西往东可以识别出宝鸡凸起、西安凹陷、骊山—临潼凸起、咸阳—渭南凸起、固市凹陷等构造区。在渭河盆地东部从北往南可以识别出韩城凹陷、临猗凸起、运城凹陷、中条山凸起、灵宝凹陷等构造区(李永善,1992)。研究区重力异常的走向、规模、分布位置与区内主要断裂具有较好的一致性,表明断裂分布对重力异常的分布特征具有较好的控制作用。秦岭造山带的重力异常条带状分布特征更加突出,表现出明显的高、低相间的条带分布特征。

随着小波细节阶数的增加,重力异常变得宽缓、平滑,主要体现了深部场源所引起的较大规模的低频重力异常信息(庞卫东等,2014;方盛明等,2002;楼海,王椿镛,2005)。3、4阶小波细节(图5c、d)对应的近似场源深度分别是20 km、23 km,都反映的是中地壳异常体信息,重力异常变化的范围在 $-5 \sim 5$ mGal。同1、2阶小波细节相比,鄂尔多斯地块南缘、渭河盆地重力异常在分布、走向及变化特征方面都发生了较大变化,小规模条带状及串珠状异常全部消失,反映出这2个构造区在纵向地壳结构上存在较大差异;秦岭造山带局部串珠状异常全部消失,重力

异常圈闭现象更加明显,圈闭空间逐渐扩大,呈带状和块状分布。与2阶小波细节相比,3、4阶小波细节的重力异常分布与渭河盆地某些构造区及断裂带分布的吻合程度略有降低,可能是因为这些构造带或断裂主要由上地壳物性差异所决定,还没有下切至中下地壳。本文研究结果还进一步表明:渭河盆地、秦岭造山带的重力异常分布与上地壳物质密度结构相关性更强,而鄂尔多斯地块南缘受沉积层物质密度结构的影响更大。秦岭造山带的商丹缝合带和勉略缝合带是两条大的构造分界线(张国伟,1991;张国伟等,1995b),在3、4阶小波细节图中特征明显。

3.4 莫霍面特征

莫霍面是地壳与地幔的分界面,本文根据 Li 等(2014)利用接收函数反演的地壳厚度,减去高程数据(张恩会等,2018)得到渭河盆地及邻区真实的莫霍面埋深,同时根据 Gomez - Ortiz 和 Agarwal (2005)的方法,基于布格重力资料反演得到研究区的莫霍面深度,将两者进行对比分析,如图6所示。从图6可以看出,利用两种方法计算得出的研究区莫霍面深度分布特征大体一致,但还存在比较明显的差异。前人研究表明,图6a显示的莫霍面深度结果更加接近真实情况,因此本文以此进行分析。

由图6a可知,研究区莫霍面埋深范围在32~50 km,横向上起伏较大。总体显示出东部浅西部

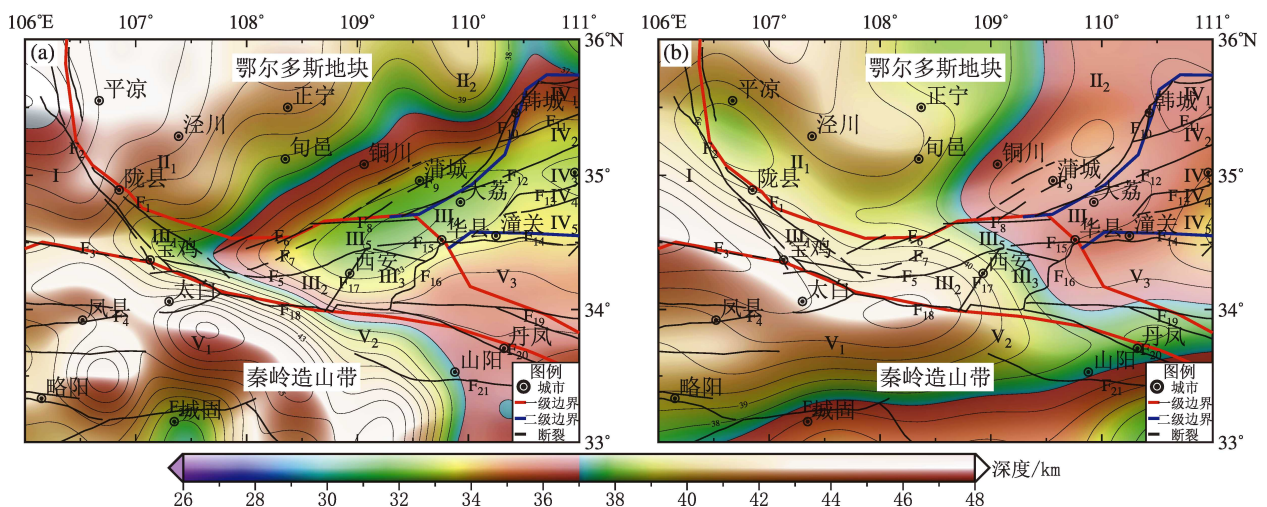


图6 基于接收函数资料(a)及重力资料(b)得到渭河盆地及邻区莫霍面埋深(断裂及构造区名称同图1)

Fig. 6 Moho depth map of the Weihe Basin and its adjacent areas based on the receiver function data (a) and the gravity data (b) (faults and the tectonic region are shown in Fig. 1)

深的特征,莫霍面起伏与布格重力异常(图3b)呈现镜像关系,与任泉等(2012)的研究结果具有较好的一致性。六盘山构造区、秦岭造山带莫霍面埋深最深,渭河盆地西部次之,鄂尔多斯地块南缘及渭河断陷中、东部埋深最浅。根据莫霍面的总体分布特征,可依据陇县—宝鸡—太白、铜川—周至—柞水和蒲城—咸阳—山阳等3条莫霍面埋深梯度带,将全区划分为4个不同区域,每个区域的莫霍面埋深呈现不同的特征。陇县—宝鸡—太白以西地区对应六盘山、西秦岭构造区,埋深44~50 km,地壳厚度由西往东逐渐变薄,这主要是由于软流圈物质的上涌,使稳定的克拉通地壳褶皱变形、地壳减薄、地震频发、岩浆活动活跃等所导致。渭河断陷中部及中秦岭构造区,地壳厚度逐渐减薄,莫霍面呈长条形分布,埋深在36~44 km,为渭河盆地西部和东部的过渡地带,变化相对平缓。渭河盆地东部与鄂尔多斯南缘地区莫霍面呈近EW向的“犁形”分布,以临潼—渭南为界呈椭圆形分布,长轴为EW向,埋深30~38 km,为整个研究区内莫霍面埋深最浅的地方,呈现明显的局部上隆特征(路利春等,2017;任隽,2012),可能与该区域的地质构造演化过程及沉积层较厚有关。总体而言,研究区的地壳深部构造轮廓与上覆构造密切相关,可清晰地显示出如下特征:莫霍面的起伏主要反映地壳厚度由东向西在加厚;莫霍面反映的深部构造块状特征清晰,凹陷区的长轴走向以NE、NW向为主,拱起区的长轴走向以NE、NEE向为主。

4 讨论

4.1 构造环境与重力异常关系

渭河盆地在大构造上位置特殊,位于华北克拉通、华南地块和青藏高原的交接部位,是发育于鄂尔多斯地块与秦岭造山带叠置部位的新生代断陷盆地。渭河盆地的形成与印度板块向欧亚板块俯冲、青藏高原隆升并向外扩张、秦岭北缘逆冲断裂带的构造反转、早第三纪以来强烈的垂直差异运动有关(Molnar, Tapponnier, 1975; Peltzer, Tapponnier, 1988; 许志琴, 张国伟, 2013),同时其也属于鄂尔多斯地块南边界与秦岭造山带北边界所夹持的渭河断陷带。渭河断陷带

是一个新生代断块,区域发育有大量断裂带,断裂带形态表现为北浅南深,且大部分属于浅源断裂和壳内断裂,这些断裂控制着渭河盆地及邻区的构造变形与地震活动性。受喜马拉雅构造运动强烈的作用与影响,渭河盆地及邻区新构造运动强烈且差异明显(任隽,2012)。

相对于鄂尔多斯地块的缓慢隆升及秦岭造山带的强烈隆升,渭河断陷带长期处于沉降运动,垂直差异运动十分强烈。第四纪时期渭河盆地在总体沉降的基础上存在2个持续凹陷和3个相对凸起,分别是西安凹陷、固市凹陷、宝鸡凸起、骊山凸起和阳廓凸起(任隽,2012)。渭河盆地及邻区地壳在纵向上分层、横向上分块,具有典型的“上凹下凸”的镜像关系。莫霍面埋深分区特征明显(图6),渭河盆地最浅,鄂尔多斯地块南缘及秦岭造山带相对较深。渭河盆地基底以渭河断裂为界,北区为下古生界分布区;南区为太古界、元古界和花岗岩混合区。受基底分区和伸展断裂系的控制,盆地盖层表现出明显的复杂断块结构。本文研究获得的重力异常分布与研究区地壳结构及地质构造具有相似的特征,所得出重力异常的转换带、梯度带或突变带与断裂展布及构造区分布相吻合。渭河盆地重力正异常是上地壳高密度体及地幔、下地壳岩浆侵入到中上地壳的表现。重力异常的不同细节图特征,在一定程度上反映出研究区不同深度岩体在不同水平尺度上的大致分布规模及岩石介质的平均密度结构特性。渭河盆地的南边界断裂构造活动性总体上存在“西弱东强”的特征,华山山前断裂强于秦岭北缘断裂,且沿着断裂的走向,其构造活动性存在明显分段性特征,分段位置与断裂走向变化关系密切。

鄂尔多斯地块的结晶基底由太古界和古元古界组成,太古界下部由变质杂岩及与其时代相当的杂岩组成;古元古界由石英片岩、云母岩、含砾石英片岩等变质碎屑岩组成,上部有浅海相陆源碎屑岩和浅海相赴美碳酸盐岩及泥质岩沉积组合。鄂尔多斯南缘的东部和西部速度结构存在差异,其西部为低速异常,东部为弱高速异常,可能的原因是鄂尔多斯地块南缘西部具有新生代和部分中生代低速沉积盖层且沉积厚度不同,西边厚东边薄(冯红武等,2019;邓军等,2005)。本文研究结果显示鄂尔多斯地块南缘东、西部重力

异常差异明显,应该与该地区自晚白垩纪以来“东隆西降”和强烈差异剥蚀改造有关(刘池洋等,2006)。

秦岭造山带 S 波速度表现为高速异常,且东、西部速度不同,呈现明显的横向不均匀性(冯红武等,2019),这和本文重力资料研究结果基本吻合,从地学角度分析,秦岭海从晚二叠纪开始到晚三叠纪结束向西关闭,东部的海相沉积岩比西部的年代更古老,且发育有大面积的基底隆起和高压变质岩基本的剥露(张国伟等,1995a)。秦岭—大巴造山带及邻区在长期地质构造作用下,一方面形成了现今地表地质构造的分区性和差异性,另一方面则造成了浅表层与深部的地球物理场特征之间的明显非协调性(周鼎武等,2002)。深地震反射成像结果揭示扬子板块向 N 向俯冲,从而导致秦岭造山带沿 EW 向的地壳结构呈现复杂性和分区特征(李洪强等,2014)。常利军等(2011)研究认为秦岭造山带可能存在一个青藏高原物质东流地幔流通道,本文研究结果显示秦岭造山带重力异常连贯性不好,似乎并不支持这种观点,但由于重力异常只反映了下地壳及以上的构造信息,还不能证实这个结论正确与否。

4.2 地震活动与重力异常关系

重力异常条带和复杂异常区与地震分布具有一定的相关性。断裂两侧异常突变带、梯度带反映了断裂两侧构造体物性的差异,复杂异常区则反映不同断裂条带的交汇或交错造成的块体破碎,这些区域往往有利于应力集中和能量积累,是地震孕育和发生的理想场所(庞卫东等,2014)。为此本文收集了有记载以来渭河盆地及邻区 $M_s > 4.0$ 地震以及 2009 年以来 $M_s > 1.0$ 地震资料,并统计了 2009—2016 年的 $M_s > 2.0$ 地震的震源深度,如图 1、表 3 所示。从图 1 可知,研究区的地震主要沿着大断裂分布,如海原—六盘山—陇县—宝鸡断裂带,渭河断裂的宝鸡—周至段,渭河断裂与渭南塬前断裂交汇处,韩城断裂与双泉—临猗断裂交汇区等。从构造区来看,研究区地震主要分布在六盘山构造区、西安凹陷、固市凹陷、运城盆地、灵宝盆地等区域;从震源深度及震级来看,研究区地震震源深度主要集中在 20 km 以内,该地区虽然历史上发生了数次 7 级以上强震,但近年来地震活动处于相对平静期,频次较低,且主要以

中小地震为主。

虽然近些年渭河断陷地震活动性较弱,但存在发生中强甚至大地震的深部构造背景,其中渭河盆地莫霍面的突变隆升和上地幔物质上涌侵入下地壳,是地震发生的深部构造背景之一。深部热物质及高密度、高速体的流动加快了板块的运动,导致板块间闭锁段的应力积累,也容易诱发地震(任隽,2012)。从图 1、表 3 可知,地震主要分布在主要断裂的边缘部位,即重力异常突变带或梯度带附近,这与图 3 揭示的重力异常差异变化及梯度带主要集中在中上地壳及以上区域具有较好的一致性。渭河盆地中小地震震源深度一般在 12 ~ 20 km,位于中地壳上部,其原因是该区域具备且满足地震的孕育、发生和发展的深部介质和构造环境条件包括深大断裂、低速高导层、莫霍面形态变化、板块边界等因素(任隽,2012;滕吉文,2009)。

冯红武等(2019)认为渭河盆地、鄂尔多斯地块和秦岭造山带各构造单元交界区域深部结构存在高速和低速的结合带,在块体间相互作用的作用下,在深部可能存在物质和能量的强烈交换,为渭河盆地及邻区的地震孕育提供条件和深部构造环境。从图 1 可知,秦岭造山带及鄂尔多斯地块南缘历史上也曾发生多次 4 ~ 5 级地震。结合本文研究结果,未来在六盘山—陇县—宝鸡断裂带、渭河盆地中部的渭河断裂与渭南塬前断裂交汇区域、韩城断裂与双泉—临猗断裂及华山山前断裂附近存在地震潜在危险,值得密切关注。

表 3 2009—2016 年渭河盆地及邻区 $M_s > 2.0$ 地震震源深度

Tab. 3 Focal depth of the $M_s > 2.0$ Earthquakes in the Weihe Basin and its adjacent areas from 2009 to 2016

震源深度/km	频次	所占比例 (%)
<10	876	83.0
10 ~ 20	170	16.1
>20	13	0.9

5 结论

本文利用 EGM2008 全球重力场模型数据构建了渭河盆地及邻区布格重力异常数据。基于小波

多尺度分析方法对布格重力异常数据进行1~4阶小波细节和逼近分解,根据平均径向对数功率谱方法量化地计算了逼近和细节信号所对应的场源平均埋深,同时结合地震、地质资料对研究区的重力异常小波逼近和小波细节特征进行分析与解释,主要得出如下结论:

(1) 研究区自由空气重力异常特征与地形特征具有强相关性,但布格重力异常与地形无关。鄂尔多斯地块、渭河盆地、秦岭造山带3个一级构造单元的布格重力异常之间存在明显差异,构造区内部重力异常也存在横向的显著差异。布格重力异常的走向、规模、分布特征与二级构造区及主要的断裂具有一定的对应关系,但是边界不是很清晰。

(2) 研究区布格重力异常的逼近场和细节场与一级、二级构造单元具有较好的对应关系。布格重力异常1~4阶细节对应4~23 km不同深度的场源信息,纵向场源信息差异对重力异常横向分布具有非常重要的影响。不同阶次的布格重力异常细节图揭示出如下地壳结构特征:①鄂尔多斯地块南缘东、西部的地壳结构存在明显的差异;②渭河盆地凹陷、凸起构造区边界清晰,断裂边界与重力异常边界具有较好的一致性;③秦岭造山带重力异常连贯性不好,东、西部重力异常变化特征表现出明显的差异。

(3) 研究区布格重力异常分布与莫霍面埋深具有非常明显的镜像关系。渭河盆地及邻区地震主要分布在主要断裂带附近或几条断裂的交汇处,如六盘山—陇县—宝鸡断裂带、渭河断裂与渭南塬前断裂交汇处、韩城断裂与双泉—临猗断裂交汇处。这些断裂也是重力异常突变带、梯度带,这些区域往往是地震孕育、发生的理想场所。此外,研究结果表明渭河盆地及邻区重力异常主要由中上地壳剩余密度体所影响,可能是该区地震以浅源地震为主的主要原因。

参考文献:

常利军,王椿镛,丁志峰. 2011. 鄂尔多斯块体及周缘上地幔各项异性研究[J]. 中国科学:地球科学,41(5):686-699.

邓军,王庆飞,黄定华,等. 2005. 鄂尔多斯盆地基底演化及其对盖层控制作用[J]. 地学前缘,12(3):91-99.

刁博,王家林,程顺有,等. 2008. 塔里木盆地东部重力异常离散小波多分辨率分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),36(4):555

-559.

刁博,王家林,程顺有. 2007. 重力异常小波多尺度分辨分析分解阶次的确定[J]. 地球科学,32(4):564-568.

丁毓玉,狄秀玲,袁志祥,等. 2000. 渭河断陷地壳三维S波速度结构和 V_p/V_s 分布图像[J]. 地球物理学报,43(2):194-202.

方盛明,张先康,嘉世旭,等. 2002. 华北地区布格重力异常的多尺度分解特征与地震活动性[J]. 大地测量与地球动力学,22(1):34-39.

冯红武,颜文华,郭瑛霞,等. 2019. 利用背景噪声成像技术反演陕西及邻区地壳剪切波速度结构[J]. 地震工程学报,41(4):978-990.

冯希杰,戴王强. 2004. 渭河盆地断层活动的横向迁移[J]. 地震学报,26(2):174-182.

韩恒悦,贺明静,李永善. 1987. 渭河盆地东部地区的活断层[J]. 地震地质,9(2):85-90.

侯遵泽,杨文采,王允,等. 2015. 重力场实数尺度小波分解及其应用[J]. 地球物理学报,58(3):1035-1041.

侯遵泽,杨文采. 1997. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析[J]. 地球物理学报,40(1):85-95.

姜文亮,张景发. 2012. 首都圈地区精细地壳结构——基于重力场的反演[J]. 地球物理学报,55(5):1646-1661.

雷姚琪,张安良. 1985. 关于渭河盆地的活动断裂、断裂深度及孕震的断裂深部展布条件[J]. 西北地震学报,7(S1):75-80.

李洪强,高锐,王海燕,等. 2014. 用深反射大炮对大巴山—秦岭结合部位的地壳下部和上地幔成像[J]. 地球物理学进展,29(1):102-109.

李晓妮,冯希杰,任隽,等. 2012. 临潼—长安断裂第四纪活动性勘探[J]. 西北地震学报,34(4):398-404.

李洋洋,李勇江,姚家骏,等. 2020. 基于布格重力异常研究运城盆地的构造特征[J]. 地震工程学报,42(4):919-926.

李永善. 1992. 西安地裂及渭河盆地活断层研究[M]. 北京:地震出版社.

刘池洋,赵红格,桂小军,等. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报,80(5):617-638.

刘良志,路利春,赵炳坤,等. 2018. 渭河盆地重磁场特征与断裂构造探讨研究[J]. 陕西地质,36(1):60-66.

刘天佑. 2017. 位场勘探数据处理新方法[M]. 北京:科学出版社.

楼海,王椿镛. 2005. 川滇地区重力异常的小波分解与解释[J]. 地震学报,27(5):515-523.

路利春,王鹏,周明霞,等. 2017. 渭河盆地重力场与构造特征关系研究[J]. 大地测量与地球动力学,37(S1):36-42.

庞卫东,张建国,沈娅宏. 2014. 云南地区重力异常的小波分解与解释[J]. 地震研究,37(4):614-619.

任隽,彭建兵,王夫运,等. 2012. 渭河盆地及邻区地壳深部结构特征研究[J]. 地球物理学报,55(9):2939-2947.

任隽. 2012. 渭河盆地深部地壳结构探测与盆地构造研究[D]. 西安:长安大学.

任泉,徐志国,杨辉,等. 2012. 鄂尔多斯地块东南缘地带 Moho 深度变化特征研究[J]. 地球物理学报,55(12):4089-4096.

- 师亚芹,冯希杰,戴王强,等. 2008. 渭河断裂西安段的展布及其结构特征[J]. 地震学报,30(6):634-647.
- 滕吉文. 2009. 中国地球深部物理学和动力学研究 16 大重要论点、论据与科学导向[J]. 地球物理学进展,24(3):801-829.
- 王谦身,滕吉文,张永谦,等. 2015. 鄂尔多斯—中秦岭—四川东部的重力异常场与深部地壳结构[J]. 地球物理学报,58(2):532-541.
- 徐志萍,姜磊,杨利普,等. 2015. 利用布格重力资料研究太行山东南缘断裂构造特征[J]. 大地测量与地球动力学,35(3):503-507.
- 许家姝,刘立家,刘银萍. 2015. Daubechies 多尺度小波分析技术及其在漠河盆地断裂带划分中的应用[J]. 地球物理学进展,29(2):595-602.
- 许志琴,张国伟. 2013. 中国(东亚)大陆构造与动力学—科学与技术前沿论坛“中国(东亚)大陆构造与动力学”专题进展[J]. 中国科学:地球科学,43(10):1527-1538.
- 杨文采,施志群,侯遵泽,等. 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.
- 原廷宏,冯希杰. 2010. 一五五六年华县特大地震[M]. 北京:地震出版社.
- 张恩会,石磊,罗娇,等. 2018. 鄂尔多斯地块及邻区重力均衡研究[J]. 地震学报,40(6):1-11.
- 张国伟,孟庆任,赖绍聪. 1995a. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学:地球科学,25(9):994-1003.
- 张国伟,张宗清,董云鹏. 1995b. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报,11(2):101-114.
- 张国伟. 1991. 试论秦岭造山带岩石圈构造演化基本特征[J]. 西北大学学报,21(2):77-87.
- 张少泉,武利均,郭建明,等. 1985. 中国西部地区门源—平凉—渭南地震测深剖面资料的分析解释[J]. 地球物理学报,28(5):460-472.
- 张永奇,韩美涛,曹建平,等. 2021. 渭河盆地及邻区现今地壳形变及构造特征研究[J]. 地震工程学报,43(1):79-89.
- 周鼎武,李文厚,张云翔,等. 2002. 区域地质综合研究的方法与实践[M]. 北京:科学出版社.
- Berteussen K A. 1977. Moho depth determinations based on spectral - ratio analysis of NORSAR long - period P waves[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors,15(1):13-27.
- Gomez - Ortiz D, Agarwal B. 2005. 3DINVER. M; A MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker - Oldenburg's algorithm[J]. Computers & Geosciences,31(4):513-520.
- Li Y H, Gao M T, Wu Q J. 2014. Crustal thickness map of the Chinese Mainland from teleseismic receiver functions[J]. Tectonophysics, 611(1):51-60.
- Molnar P, Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia; Effects of a continental collision; Features of recent continental tectonics in Asia can be interpreted as results of the India - Eurasia collision[J]. Science,189(4201):419-426.
- Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, *et al.* 2012. The development and evolution of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) [J]. Journal of Geophysical Research, 117: B04406.
- Peltzer G, Tapponnier P, Zhang Z, *et al.* 1985. Neogene and Quaternary Faulting in and along the Qinling Shan[J]. Nature,317(6037):500-505.
- Peltzer G, Tapponnier P. 1988. Formation and evolution of strike - slip faults, rifts, and basins during the India - Asia Collision; An experimental approach[J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 93(B12):15085-15117.
- Sandwell D T, Smith W H F. 2009. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS - 1 altimetry; Ridge segmentation versus spreading rate [J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 114(B1):B01411.
- Spector A, Grant F S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data[M]. Geophysics,35(2):293-302.

Multi-scale Wavelet Decomposition and Interpretation of Gravity Anomalies in the Weihe Basin and Its Adjacent Areas

ZHANG Yongqi^{1,2}, HAN Meitao², ZHANG Enhui², ZHENG Zengji², CAO Jianping², SONG Puwei²

(1. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

(2. Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract

Based on the EGM2008 gravity field model, we obtain the Bouguer gravity anomalies in the Weihe Basin and its adjacent areas. And using the wavelet multi-scale decomposition method we decompose the Bouguer gravity anomalies to 4 – order wavelet approximation and details. Based on the average, radial, logarithmic power spectrum, we calculate the average depth of the field source corresponding to 1st, 2nd, 3rd, and 4th order wavelet approximation and details. Then we analyze the obtained gravity field on the basis of the regional geological and seismic data, and get the following conclusions: ① The Bouguer gravity anomalies in first – order tectonic units, the Ordos block, the Weihe basin, and the Qinling orogenic belt, are obviously different, and the Bouguer gravity anomalies within each tectonic unit are horizontally different. The trend, scale, and distribution of the Bouguer gravity anomalies correspond with the secondary structural regions and the major faults in the research areas. ② The 1st to 4th – order details of the Bouguer gravity anomaly in the Weihe basin and its adjacent areas correspond to the field source information at depths between 4 km and 23 km. The details of the Bouguer gravity anomaly at different orders reveal the following crustal structure features: The crustal structure in the east and west of the southern margin of the Ordos block is obviously different; The boundaries of sags and uplifts in the Weihe Basin are clear and the fault's boundaries are consistent with the gravity anomaly boundaries; The continuity of gravity anomalies in the Qinling orogenic belt is poor, and the variation characteristics of gravity anomalies in the east region are obviously different with those in the west. ③ The distribution of the Bouguer gravity anomalies in the Weihe Basin and its adjacent areas has a clear mirror – image relation with the Moho depth. The earthquakes in the Weihe Basin and its adjacent areas mainly occur in the Liupanshan – Longxian – Baoji fault zone, at the intersection of the Weihe fault and the Weinan Yuanqian fault, and at the intersection of the Hancheng fault and the Shuangquan – Linyi fault. In addition, the gravity anomalies in the Weihe basin and its adjacent areas are mainly affected by the residual density of the middle and upper crust, which may be the reason why the shallow – focus earthquakes are prone to occur in this area.

Keywords: the Weihe Basin and its adjacent areas; Bouguer gravity anomaly; multi-scale wavelet decomposition; the Moho depth