

何辛,姬计法,李勇江,等. 2025. 贺兰山—银川地堑重力异常小波多尺度特征及构造含义[J]. 地震研究, 48(4): 594–601, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0060.

He X, Ji J F, Li Y J, et al. 2025. Multi-scale wavelet features and tectonic implications of the gravity anomaly in the Helanshan – Yinchuan Graben[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(4): 594–601, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0060.

贺兰山—银川地堑重力异常小波多尺度特征及构造含义*

何辛, 姬计法, 李勇江, 冯建林

(中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002)

摘要: 基于流动地球物理场观测项目获得的相对重力数据, 对贺兰山—银川地堑及邻区深部构造进行讨论。计算获得研究区布格重力异常, 采用小波多尺度分解方法对布格重力异常进行2~5阶小波细节分解, 结合区域地质、地球物理资料, 对重力场结果进行分析。结果表明: 贺兰山—银川地堑布格重力异常与邻区有较大差异, 小波细节特征显示在横向上同邻区也有较大差异, 贺兰山—银川地堑构造更为复杂, 以独立的小地块形式存在于阿拉善微陆块、华北陆块以及祁连早古生代造山带之间。贺兰山—银川地堑及邻区断裂主要为浅源和壳内断裂, 主要分布在牛首山、贺兰山东麓、银川地堑东缘周围。这些断裂带也是重力异常突变带、梯度带, 是孕育地震的理想环境。此外研究区中上地壳重力异常明显, 可能是导致该地区地震以浅源地震居多的主要原因。

关键词: 贺兰山—银川地堑; 布格重力异常; 小波多尺度分解

中图分类号: P315.726

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)04-0594-08

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0060

0 引言

古地震和历史地震研究表明, 在板块边界的大型断裂带上, 强震具有明显的活跃期与平静期交替的现象; 在活跃期内, 强震成组或丛集发生, 频次较高; 在平静期内, 强震活动较少或缺失 (Agnon, 2014)。鄂尔多斯地块西缘的历史强震分析同样显现出明显的强震活跃期与平静期交替现象。16世纪前后该地区存在地震应变能加速释放的现象, 这与整个南北地震带北段历史强震应变能加速释放的过程相似 (M7 专项工作组, 2012)。鄂尔多斯活动地块西缘边界带断裂的几何学、运动学性质各异, 从中晚始新世开始银川地堑快速沉降, 贺兰山快速隆升, 形成了中国最典型的盆山构造单元 (赵红格等, 2007; 张岳桥等, 2006)。

贺兰山—银川地堑构造的特殊性吸引了众多学者对其进行研究。大陆动力学研究显示该区在早古生代末期发生了被动大陆边缘向活动大陆边缘转化的重要过程, 在中生代晚期中亚造山带向南增生形成弧后伸展盆地 (赵红格等, 2007; 董云鹏等, 2021)。始新世到渐新世贺兰山进入陆内伸展阶段, 银川地堑逐步发育形成, 且这种伸展构造形变至今仍未停止 (Darby, Ritts, 2002)。大地电磁测深研究表明贺兰山和银川地堑表现为典型的山脉高阻体和盆地低阻体的盆山构造特征, 其中银川地堑北部存在着延伸至上地幔的大规模低阻结构, 该低阻结构可能反映了幔源物质上涌活动 (赵凌强等, 2023)。P波速度结构研究显示该区域地壳结构呈现“隆凹”起伏变化, 表现出局部挤压变形特征, 且在贺兰山中—下地壳存在高低速相间、低于其周围介质速度的低速层 (王

* 收稿日期: 2024-09-16.

基金项目: 中国地震局地球物理勘探中心青年基金资助项目 (YFGEC2023005).

第一作者简介: 何辛 (1994-), 助理工程师, 主要从事地震监测预报及深部构造相关研究.

E-mail: xinjack123@163.com.

帅军等, 2019)。强震的孕育和发生是一个复杂的物理过程, 受区域应力场及主要活动断裂带的控制以及深部物性结构和动力学环境的影响。贺兰山—银川地堑地震活动频繁, 在 1793 年发生过平罗 8 级地震, 1970 年以后 4 级以上地震频发, 因此对贺兰山—银川地堑地下构造特征进行研究具有重要意义。

布格重力异常反映的是地球内部不同深度、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可以揭示区域地壳、上地幔结构及介质密度变化以及区域地震活动性 (张永奇等, 2022)。对布格重力异常进行位场分离能够将其分离到不同深度尺度, 可更好地分析与解释布格重力异常。常用的位场分离方法有多种, 如小波多尺度分析法 (侯遵泽, 杨文采, 1997)、优化滤波法 (Meng *et al.*, 2009)、归一化总水平导数 (王万银, 2009) 等, 其中小波多尺度分析法是分析重力异常资料的常用方法之一。目前已有研究多基于 EGM2008 和 WGM2012 全球重力模型数据, 模型数据以卫星重力数据为主, 经过 DTU10 全球潮汐模型和 ETOPO1 地形数据模型进行校正获得, 由于中国西部的模型数据精度较低, 且缺少地面重力数据控制, 因此有必要使用地面重力数据对贺兰山—银川地堑深部构造进行针对性研究。本文基于流动地球物理场观测项目获得的相对重力数据, 采用小波多尺度分解方法对布格重力异常数据进行处理, 利用径向对数功率谱方法计算小波多尺度分解结果对应的近似场源深度。结合地质、地球物理学相关资料, 揭示地下结构特征, 分析研究区地下介质密度变化规律及相应的构造动力学含义, 从重力学角度为贺兰山—银川地堑发震构造研究提供依据。

1 研究方法

小波的原始概念最早是 Morlet 和 Grossmann 在 20 世纪 70 年代分析地球物理数据时引进的, 小波变换继承了 Fourier 变换的优点, 凭借其技术优势被广泛应用于多个领域, 如重力场异常分解研究 (张永奇等, 2022; 侯遵泽, 杨文采, 1997; 玄松

柏等, 2012; 陈兆辉等, 2020)。

在实际重力工作中, 应用最多的是二维重力异常, 因此进行二维重力异常多尺度分解更具有实际意义。对于二维平面上的函数 $f(x, y)$, 设 $\{V_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 为一维多尺度分析, 其尺度函数 $\varphi(x)$ 和小波函数 $\psi(x)$ 满足双尺度方程, 令 $V_j^2 = V_j \otimes V_j$, 则 $\{V_j^2\}_{j \in \mathbb{Z}}$ 构成一个二维多尺度分析, 尺度函数为:

$$\varphi(x, y) = \varphi(x) \cdot \varphi(y) \quad (1)$$

小波函数为:

$$\begin{aligned} \psi^h(x, y) &= \psi(x) \cdot \varphi(y) \\ \psi^v(x, y) &= \varphi(x) \cdot \psi(y) \\ \psi^d(x, y) &= \psi(x) \cdot \psi(y) \end{aligned} \quad (2)$$

令函数 $f(x, y) \in \{V_j^2\}_{j \in \mathbb{Z}}$, $A_f f(x)$ 表示 V_j^2 空间的低频细节部分, $D_j^h f(x)$ 、 $D_j^v f(x)$ 和 $D_j^d f(x)$ 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, 则:

$$A_j f(x, y) = A_{j+1} f(x, y) + D_{j+1}^h f(x, y) + D_{j+1}^v f(x, y) + D_{j+1}^d f(x, y) \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} A_{j+1} f(x, y) &= \sum_{m_1, m_2 \in \mathbb{Z}} S_{m_1, m_2}^{j+1} \varphi_{j, m_1, m_2} \\ D_{j+1}^T f(x, y) &= \sum_{m_1, m_2 \in \mathbb{Z}} d_{m_1, m_2}^{T, j+1} \psi_{j, m_1, m_2}^T \quad (T = h, v, d) \end{aligned} \quad (4)$$

而

$$\begin{aligned} S_{m_1, m_2}^{j+1} &= \sum_{k_1, k_2 \in \mathbb{Z}} h_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} s_{j, m_1, m_2} \\ d_{m_1, m_2}^{h, j+1} &= \sum_{k_1, k_2 \in \mathbb{Z}} h_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} s_{j, m_1, m_2} \\ d_{m_1, m_2}^{v, j+1} &= \sum_{k_1, k_2 \in \mathbb{Z}} g_{k_1-2m_1} h_{k_2-2m_2} s_{j, m_1, m_2} \\ d_{m_1, m_2}^{d, j+1} &= \sum_{k_1, k_2 \in \mathbb{Z}} g_{k_1-2m_1} g_{k_2-2m_2} s_{j, m_1, m_2} \end{aligned} \quad (5)$$

这样, 对于二维重力异常场, 同样可以进行小波多尺度分解:

$$\begin{aligned} \Delta g(x, y) &= A_0 f(x, y) = A_i f(x, y) + \\ &\sum_{j=1}^i \left[D_j^h f(x, y) + D_j^v f(x, y) + D_j^d f(x, y) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

令具有规则网格的重力异常数据为 V_0^2 , 空间尺度

函数的系数为 $\{s^0\}$, 根据公式 (5) 可以计算出其他空间中尺度函数的系数 $\{s^j\}$ 和小波函数的系数 $\{d^{h,j}\}$ 、 $\{d^{v,j}\}$ 及 $\{d^{d,j}\}$ 。同样可以实现二维重力异常的小波多尺度分解, 简记为:

$$\Delta g(x) = A_j G + D_j G + \cdots + D_3 G + D_2 G + D_1 G \quad (7)$$

式中: G 是小波变化 j 阶逼近部分; $D_j G$ (水平方向、垂直方向和对角线方向 3 个细节部分之和) 是第 j 阶小波变换高频细节部分, 其中 $j=2 \sim 5$ 。

功率谱是一种常用的重磁场解析处理方法, 最早是由 Spector 和 Grant (1970) 提出的。在小波多尺度分解的基础上, 采用功率谱分析可以计算出场源近似深度。在极坐标系下, 功率谱的表达式为:

$$E(r) = |S(u, v)|^2 = A^2 e^{-2hr} \quad (8)$$

两边取对数可得:

$$\ln E(r) = \ln A^2 - 2hr \quad (9)$$

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 呈线性关系, 其直线斜率为 $-2h$ 。通过最小二乘法拟合出斜率直线, 计算该直线斜率即为等效场源深度, 其表达式为:

$$h = \frac{\ln r_1 - \ln r_2}{2(r_1 - r_2)} \quad (10)$$

2 数据处理

本文研究区域为贺兰山—银川地堑及其邻区 ($37.5^\circ \sim 39.5^\circ \text{N}$, $105.5^\circ \sim 107^\circ \text{E}$), 如图 1 所示。数据来源于地球物理场流动观测项目, 均由中国地震局地球物理勘探中心使用 Burris 和 LaCoste 重力仪采集获得, 仪器采集精度达到 $3 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。由于 2018 年测区优化, 测点数大量减少, 同时增加了部分新点。综合考虑后, 选择优化前最后一期 (2017 年) 以及优化后最新一期 (2023 年) 观测数据作为原始数据, 经整理挑选后, 最终数据共有 79 个。与本文研究区测点密度相似的川西地区流动重力网场源分辨能力评估结果显示, 川

西地区流动重力测网最大点距约为 40 km, 平均点距约为 18.5 km (本文研究区平均点距 20 km), 基于深度 10 km、厚度 100 m 的异常体参数, 川西流动重力网的场源反演能力最高可达 $(\pm 30 \sim \pm 40) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 对应空间分辨率为 $0.50^\circ \times 0.50^\circ$ (徐伟民等, 2021; 王林海等, 2021)。本文使用流动重力数据平均精度为 $12 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 具备探测深度 10 km 处厚度 100 m 异常体的能力, 对于中地壳以下深度, 则以讨论更大尺度构造特征为主。

以石嘴山、盐池、固原、北塔、小口子绝对重力基准点作为控制点, 对 79 个测点进行经典平差计算后, 获得了各测点的重力值, 平均点值精度为 $12 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。重力点坐标使用手持 RTK (Real-time kinematic) 仪器测定, 能够达到厘米级定位精度。对各测点重力值进行正常场重力改正、自由空气改正、地形改正和高度改正, 其中地形改正使用航天飞机雷达地形测绘任务 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数据, 最终得到了研究区布格重力异常 (图 1b)。从图 1b 可见, 研究区 SW 向的祁连造山带及银川地堑出现明显的布格重力低值异常区 (蓝色区域), 高值异常区出现在贺兰山、石嘴山至乌海一带 (红色区域)。高值异常区的产生可能与深部地壳结构及密度有关, 如上地幔热物质上涌、岩石密度差异等。板块活动也是高值区产生的原因之一, 青藏高原 NE 向的运动, 受到刚性的鄂尔多斯块体及阿拉善块体的阻拦, 在贺兰山处造成了物质堆积相关。贺兰山东麓呈现出明显的布格重力异常梯度带, 而在吴忠的西、南、东 3 侧呈现出较缓的环形梯度带。

由于布格重力异常是不同深度场源信息的叠加场, 对地质构造及断裂分布分辨率较低, 不能有效反映出深部构造等, 需要对其进行不同场源深度的信息分离。本文使用 Daubechies 小波对研究区布格重力异常进行分解, 得到了 2~5 阶小波细节场。再根据对数功率谱方法计算出 2~5 阶小波细节场的等效场源深度, 绘制出径向对数功率谱 (图 2)。2~5 阶小波细节场对应的等效场源深度分别为 8.9、15.2、30.4 和 50.1 km。

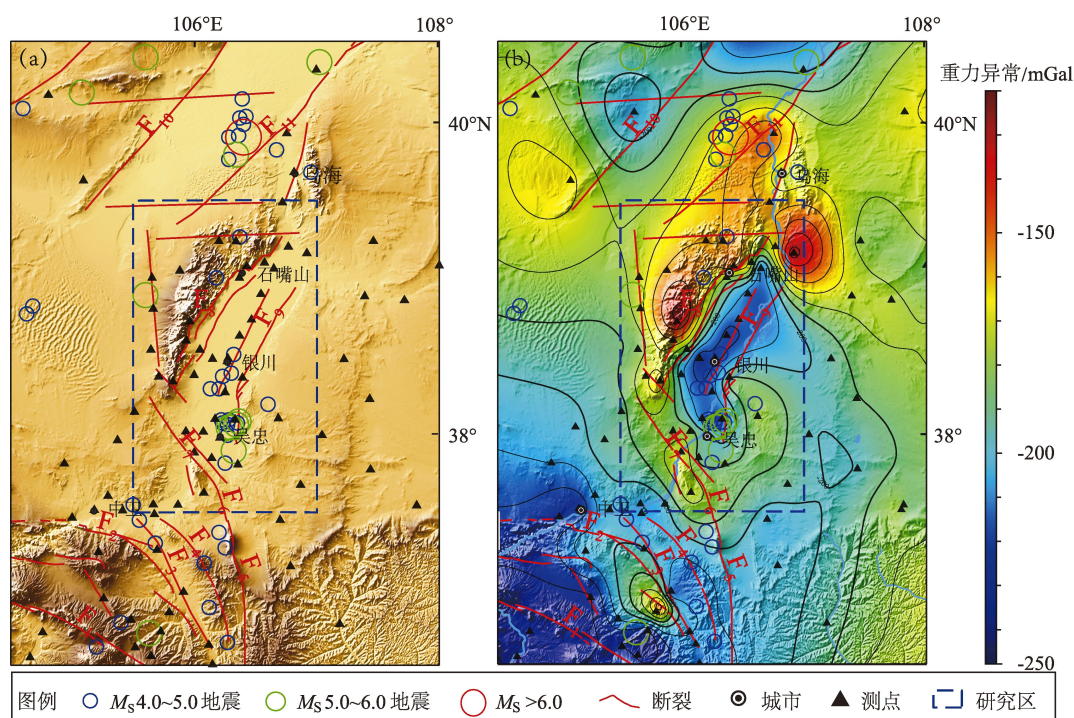


图1 研究区流动重力测点位置 (a) 及布格重力异常 (b)

Fig. 1 The location of the measuring points of the mobile gravimetric network (a) and the Bouguer gravity anomaly (b) in the study area

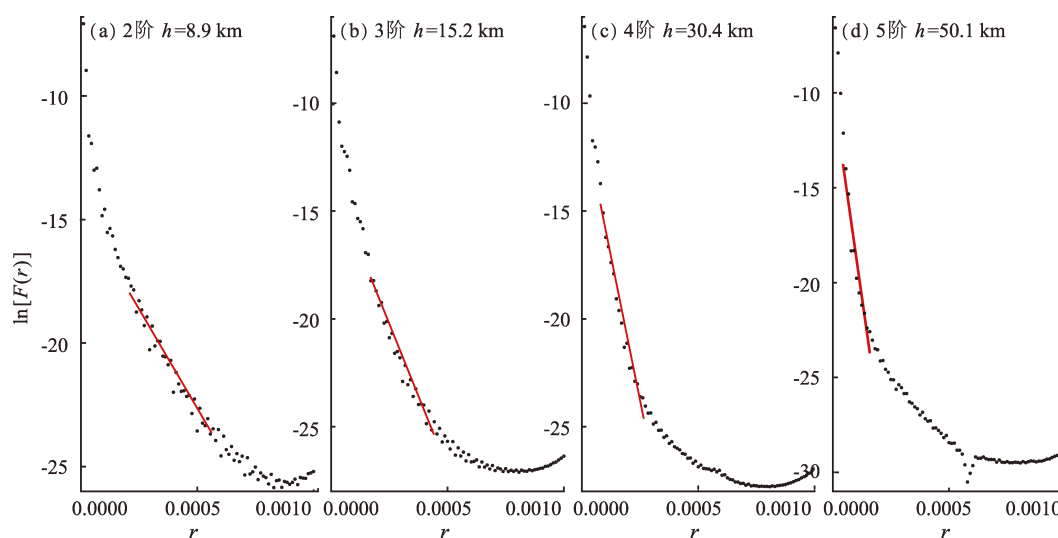


图2 2~5阶小波细节径向对数功率谱

Fig. 2 The radial power spectra of the 2nd to -5th order wavelet details

3 重力场特征分析

研究区小波多尺度分解如图3所示。由于1阶细节场主要反映地表沉积情况,其对应深度的小波细节场结构较为破碎,因此本文不做讨论。

本文主要讨论2~5阶小波细节场,对应的等效场源深度为8.9~50.1 km。

2阶细节场的等效场源深度为8.9 km,反映了上地壳的布格重力异常,变化范围为-14~22 mGal,其分布特征较为破碎,且与构造关联紧密。贺兰山—银川地堑处重力异常变化明显,呈狭长的

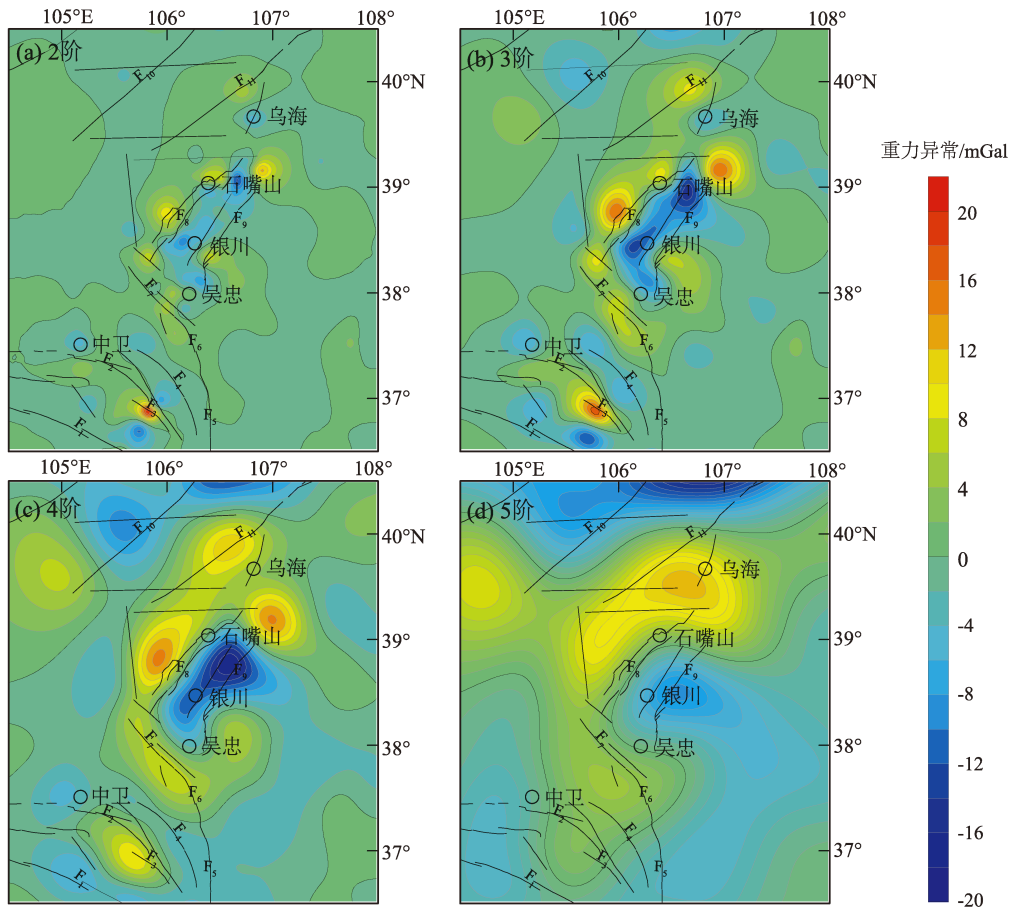


图3 贺兰山—银川地堑及其邻区小波多尺度分解

Fig. 3 Multi-scale wavelet decomposition of the Helanshan - Yinchuan Graben and its adjacent areas

串珠状分布, 正负异常自北向南由 NE 向逐渐转为近 SN 向, 与贺兰山走向相吻合, 且伴生出正负差异变化较小的重力异常梯度带。2 阶细节场显示出上地壳盖层物质横向分布不均匀, 岩石物性存在差异; 其余位置重力异常变化平缓, 没有明显的重力梯度带, 表明地下结构较为稳定。

3 阶细节场等效场源深度为 15.2 km。与 2 阶细节场相比, 反映出的重力异常范围更大, 关联性更强, 重力异常由串珠状分布转为有一定关联性的区域分布。正异常集中在贺兰山及石嘴山 NEE 处, 银川地堑则表现为明显的负异常, 正负异常范围为 $-20 \sim 20$ mGal。阿拉善地块和鄂尔多斯地块重力异常差异较小, 表明该区域刚性更强, 块体活动性不强, 且具有较为一致的结晶基底和较为相似的物质密度。3 阶小波细节场的重力异常变化差异更加明显, 在贺兰山—银川地堑位置勾勒出更为明显的断裂分布和分区轮廓, 研究区的重力异常走向、规模与分布与区内断裂具有明显

的一致性, 表明贺兰山—银川地堑处的断裂对重力异常分布特征有良好的控制作用 (张永奇等, 2022)。

4 阶和 5 阶细节场的等效场源深度分别为 30.4 和 50.1 km。主要反映下地壳的重力异常分布情况。随着小波分解阶数的增加, 重力异常分布较 2、3 阶有了明显的变缓和平滑, 主要体现了由深部场源引起的较大尺度的低频重力异常信息 (方盛明等, 2002)。其中 4 阶与 3 阶细节场在形态上较为相似, 但异常梯度带愈发平缓, 表明该深度的地下构造对重力异常特征的控制作用减弱。5 阶细节场中, 重力异常形态发生了明显变化, 串珠状及条带状异常全部消失, 取而代之的是连为整体的重力异常, 正异常出现在贺兰山至乌海区域, 峰值出现在乌海与石嘴山中间, 负异常出现在银川东侧, 该重力异常形态与该区域开展的大地电磁测深研究结果相近 (赵凌强等, 2023), 其原因为上地幔热物质在银川地堑处上涌所导致。

4 讨论

贺兰山—银川地堑位于青藏高原 NE 向扩展的前缘位置，处于阿拉善微陆块、华北陆块以及祁连早古生代造山带 3 个 II 级构造版交会的三角区域，晚新生代构造变形及地震活动十分活跃。贺兰山的快速隆升和银川地堑的强烈下陷，改变了鄂尔多斯盆地西缘中生代的整体构造格局，加强并改变了盆地西缘南部和北部东西向地质结构及地貌特征的差异（赵红格等，2007）。本文获得的布格重力异常延伸方向与区域内地质构造走向相一致，布格重力异常中得到的转换带、梯度带与断裂展布和构造分区吻合良好。小波分解结果显示贺兰山—银川地堑与板块交界的其余位置具有不同的异常特性，贺兰山—银川地堑具有更加复杂的构造环境，活动性明显强于邻区。复杂的构造环境使得区域内发育了大量断裂带，大部分属于壳内断裂和浅源断裂，北侧断裂向下延伸较深，4 阶和 5 阶的小波细节场与构造的对应关系较 2 阶、3 阶有所降低，指示出研究区内主要断裂没有下切到中下地壳。

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会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）。研究区 1970 年以后 4 级以上地震频发，主要沿断裂分布，如牛首山断裂、贺兰山东麓断裂、银川地堑东缘黄河断裂等（图 1）。其中以吴忠、灵武地区地震最为集中，共有 9 次。从震源深度看，吴忠、灵武地区地震震源深度集中在 15 km 附近（表 1），在小波 3 阶细节场中该位置为正异常并以 V 型包围的负异常形态存在（图 3b），也反映出该区域两侧存在构造物性差异。

年代学资料显示，银川地堑在新近纪后进入快速的断陷扩张期，盆地内部构造活动强度急剧增大，随着时间的推移研究区内断裂可能进一步发展和扩大（赵红格等，2007）。深部的热物质及密度、速度差异体的运动加快了板块运动，导致板块间闭锁段发生应力积累，容易诱发地震

表 1 吴忠、灵武地区 4 级以上地震震源深度

Tab. 1 Depths of the earthquake sources ($M_s > 4.0$) in Wuzhong area and Lingwu area

地区	发震 年份	震中位置		M_w	震源深度/ km
		$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$		
吴忠市利通区	1971	37.90	106.32	5.1	23.0
银川市灵武市	2021	38.00	106.27	4.0	19.0
银川市灵武市	1984	38.05	106.30	5.3	17.0
银川市灵武市	1987	38.05	106.28	5.2	10.0
银川市灵武市	1988	38.07	106.34	5.4	14.0
银川市灵武市	1988	38.08	106.35	4.3	27.0
银川市灵武市	1988	38.09	106.36	5.1	9.0
银川市灵武市	1988	38.10	106.28	4.3	10.0
银川市灵武市	2009	38.20	106.60	4.3	9.0

（任隽等，2012）。贺兰山—银川地堑表现为典型的山脉高阻体和盆地低阻体的构造特征，其中银川地堑北部存在着延伸至上地幔的大规模低阻结构，该低阻结构可能代表着幔源物质上涌活动（赵凌强等，2023）。壳幔速度结构显示在贺兰山—银川地堑区域中地壳深度起伏较大，表现出强烈的横向非均匀性、具有强烈的挤压褶皱构造形变，特殊的构造变形揭示出青藏高原与鄂尔多斯块体以及阿拉善块体相互碰撞使得区域内介质由塑性向脆性变化，从而使岩石破碎、介质速度弱化，导致剖面速度结构产生差异，形成过渡带结构特征（王帅军等，2019）。2 阶、3 阶小波细节场反映出的地下密度剧烈变化、电性结构以碎片状低阻体为主及速度结构的横向非均匀性，均是地质构造运动留下的地球物理学痕迹。青藏高原 NE 方向的运移和阿拉善地块向南的俯冲碰撞楔入，在遇上刚性的鄂尔多斯块体的阻拦后共同造就了贺兰山—银川地堑复杂的构造环境，也为地震的孕育提供了足够的前置条件。

虽然该区域地震以中小地震为主，但考虑到整个贺兰山—银川地堑及其邻区的发展历史，结合深部构造背景，不排除未来发生中强甚至大地震的可能，值得密切关注。

5 结论

本文利用地球物理场流动观测项目获得的流

动重力数据构建了贺兰山—银川地堑及邻区布格重力异常模型。基于小波多尺度分解方法对布格重力异常进行了 2~5 阶分解,利用对数功率谱计算出各阶近似场源深度,同时结合地球物理、地质资料对研究区布格重力异常和小波细节特征进行了分析和解释,得出以下主要结论

(1) 贺兰山—银川地堑布格重力异常与其邻区有较大差异,小波细节特征显示在横向上同邻区也有较大差异。贺兰山—银川地堑构造更为复杂,以独立的小地块形式存在于阿拉善微陆块、华北陆块以及祁连早古生代造山带之间。

(2) 贺兰山—银川地堑重力梯度带指示出研究区地下介质的不均匀性,存在较强的物性差异。地下密度的强烈变化是贺兰山—银川地堑地震频发的重力学背景。

(3) 贺兰山—银川地堑及其邻区的断裂主要为浅源和壳内断裂,主要分布在牛首山、贺兰山东麓、银川地堑东缘周围。这些断裂带也是重力异常突变带、梯度带,是孕育地震的理想环境。研究区中上地壳重力异常明显,可能是该地区地震以浅源地震居多的主要原因。

感谢中国地震局地球物理勘探中心“地球物理场流动观测项目”为本研究提供数据。

参考文献:

- 陈兆辉,刘金钊,张双喜,等. 2020. 苍梧 $M_s 5.4$ 地震孕震环境的多尺度重力场分析及动力学意义[J]. 大地测量与地球动力学, 40(2): 175–181.
- Chen Z H, Liu J Z, Zhang S X, et al. 2020. Multiscale gravity field analysis and dynamic significance of seismogenic environment in Cangwu $M_s 5.4$ earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 40(2): 175–181. (in Chinese)
- 董云鹏,李玮,张菲菲,等. 2021. 南北构造带北段贺兰山的形成与演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 51(6): 951–968.
- Dong Y P, Li Wei, Zhang F F, et al. 2021. Formation and evolution of the Helan Mountain in the northern section of the North–South Tectonic Belt [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 51(6): 951–968. (in Chinese)
- 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.
- Fang S M, Zhang X K, Jia S X, et al. 2002. Multi–scale decomposition of Bouguer gravity anomaly and seismic activity in north China [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 22(1): 34–39. (in Chinese)
- 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.
- Hou Z Z, Yang W C. 1997. Wavelet transform and multi–scale analysis on gravity anomalies of China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 40(1): 85–95. (in Chinese)
- 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.
- Pang W D, Zhang J G, Shen Y H. 2014. Wavelet decomposition and interpretation of gravity anomaly in Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 37(4): 614–619. (in Chinese)
- 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.
- Ren J, Peng J B, Wang F Y, et al. 2012. The research of deep structural features of Weihe Basin and adjacent areas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(9): 2939–2947. (in Chinese)
- 王林海,陈石,张贝,等. 2021. 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震前重力场源变化分析[J]. 地震, 41(1): 78–92.
- Wang L H, Chen S, Zhang B, et al. 2021. Analysis of the variation of gravity field source before the 2013 Lushan $M_s 7.0$ earthquake [J]. Earthquake, 41(1): 78–92. (in Chinese)
- 王帅军,刘保金,田晓峰,等. 2019. 青藏高原东北缘地壳 P 波速度结构及其对地壳变形研究的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 49(2): 368–382.
- Wang S J, Liu B J, Tian X F, et al. 2019. Crustal P–wave velocity structure in the northeastern margin of the Qinghai–Tibetan Plateau and insights into crustal deformation [J]. Scientia Sinica Terrae, 49(2): 368–382. (in Chinese)
- 王万银. 2009. 位场边缘识别方法技术研究[D]. 西安: 长安大学.
- Wang W Y. 2009. Research on the technology of field edge recognition method [D]. Xi'an: Chang'an University. (in Chinese)
- 徐伟民,陈石,阮明明,等. 2021. 川滇地区陆地流动重力测网场源分辨能力评估[J]. 地震, 41(1): 191–204.
- Xu W M, Chen S, Ruan M M, et al. 2021. Evaluation of field source resolution of terrestrial mobile gravity network in Sichuan–Yunnan region [J]. Earthquake, 41(1): 191–204. (in Chinese)
- 玄松柏,邢乐林,谈洪波,等. 2012. 中国大陆 2000–2007 年重力场变化多尺度分解[J]. 大地测量与地球动力学, 32(3): 7–16.
- Xuan S B, Xing L L, Tan H B, et al. 2012. Wavelet multi–scale decomposition of gravity field variations during 2000–2007 in China mainland [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 32(3): 7–16. (in Chinese)
- 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.
- 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. (in Chinese)
- 张岳桥,廖昌珍,施伟,等. 2006. 鄂尔多斯盆地周边地带新构造演化及其区域动力学背景[J]. 高校地质学报, 12(3): 285–297.

- Zhang Y Q, Liao C Z, Shi W, *et al.* 2006. Neotectonic evolution of the peripheral zones of the Ordos Basin and geodynamic setting[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12 (3): 285 – 297. (in Chinese)
- 赵红格, 刘池洋, 王锋, 等. 2007. 贺兰山隆升时限及其演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 37 (S1): 185 – 192.
- Zhao H G, Liu C Y, Wang F, *et al.* 2007. Uplifting time and evolution of Helan Mountain [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 37 (S1): 185 – 192. (in Chinese)
- 赵凌强, 孙翔宇, 詹艳, 等. 2023. 贺兰山—银川地堑三维深部电性结构特征及其地球动力学意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 53 (3): 481 – 496.
- Zhao L Q, Sun X Y, Zhan Y, *et al.* 2023. Characteristics of the three – dimensional deep electrical structure in the Helan Mountains – Yinchuan Basin and its geodynamic implications [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 53 (3): 481 – 496. (in Chinese)
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中 – 长期危险性研究 [M]. 北京: 地震出版社.
- M7 Special Working Group. 2012. A study of the medium- and long – term risk of large earthquakes in mainland China [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- Agnon A. 2014. Pre – instrumental earthquakes along the Dead Sea Rift [M] // Garfunkel Z, Ben – Avraham Z, Kagan, E. *Dead Sea Transform Fault System: Reviews. Modern Approaches in Solid Earth Sciences* (vol. 6). Dordrecht: Springer, Netherlands.
- Darby B J, Ritts B D. 2002. Mesozoic contractional deformation in the middle of the Asian tectonic collage; the intraplate Western Ordos fold – thrust belt, China [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 205 (1 – 2): 13 – 24.
- Meng X, Guo L, Chen Z, *et al.* 2009. A method for gravity anomaly separation based on preferential continuation and its application [J]. *Applied Geophysics*, 6 (3): 217 – 225.
- Spector A, Grant F S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data [J]. *Geophysics*, 35 (2): 293 – 302.

Multi – scale Wavelet Features and Tectonic Implications of the Gravity Anomaly in the Helanshan – Yinchuan Graben

HE Xin, JI Jifa, LI Yongjiang, FENG Jianlin

(*Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China*)

Abstract

Using the relative gravity data obtained from the mobile gravimetric network of the geophysical field observation project, we calculated the Bouguer gravity anomaly in the Helanshan – Yinchuan Graben and its adjacent areas. We used the multi – scale wavelet decomposition method to perform a detailed 2nd – to – 5th order wavelet decomposition of the Bouguer gravity anomaly, and we further estimated the approximate source depth of the detailed 2nd – to – 5th order wavelet field by the radial logarithmic power spectrum method. We analyzed these results by the help of the regional geological and geophysical data in the study area. We found that the Bouguer gravity anomaly in the Helanshan – Yinchuan Graben is significantly different from that in the adjacent areas, and the detailed wavelet features show significant differences in the horizontal direction. The Helanshan – Yinchuan Graben has more complex structures; these structures exist in the form of independent small blocks between the Alxa micro – landmass, the North China landmass, and the Qilian Early Paleozoic orogenic belt. The faults in the Helanshan – Yinchuan Graben and the adjacent areas are mainly shallow – sourced and intercrustal faults, mainly distributed around the Niushoushan Mountain fault, the East Helanshan Mountain fault, and the Yellow River fault zone on the eastern edge of the Yinchuan Graben. These fault zones are also zones of abrupt changes in gravity anomaly and gradient zones, the earthquake – prone environment. In addition, the gravity anomaly in the upper and middle Crust in the study area is obvious, which may be the main reason for the predominance of shallow earthquakes in the study area.

Keywords: the Helanshan – Yinchuan Graben; the Bouguer gravity anomaly; multi – scale wavelet decomposition