引文格式:庞琪沛,吴云龙,徐景田,等.甘肃积石山Ms 6.2地震深部构造特征和动力学过程[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):356-367.DOI:10.13203/j.whugis20240085

Citation: PANG Qipei, WU Yunlong, XU Jingtian, et al. Deep Structural Characteristics and Dynamic Processes of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake and Its Adjacent Areas[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(2): 356-367. DOI:10.13203/j.whugis20240085

甘肃积石山Ms 6.2地震深部构造特征和动力学过程

庞琪沛[1] 吴云龙[1,2] 徐景田[1] 史绪国[1] 张 毅[2]

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074

2 中国地质大学(武汉)地质探测与评估教育部重点实验室,湖北 武汉,430074

摘 要:2023-12-18甘肃临夏回族自治州积石山县发生Ms 6.2地震,这是2023年造成中国人员伤亡最严重的地震。强震的孕育和发生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。在震源区及周边区域开展深部构造特征和孕震环境研究,对于揭示该地区强震成因及开展防震减灾工作具有重要意义。基于XGM2019e全球重力场模型,利用小波多尺度分析和三维地壳密度结构反演等方法对布格重力异常数据进行了处理和分析,从重力学的角度分析了研究区域深部构造特征和动力学过程。结果表明,震源区及周边布格重力异常整体表现为负异常,变化范围在-170~-530 mGal之间,上、中地壳构造运动活跃,地壳内部出现高、低密度体错综复杂的现象。该区域位于阿拉善块体、鄂尔多斯块体和青藏高原块体之间的一条弧形重力梯度条带上,计算结果佐证了青藏高原物质在板块碰撞的影响下向东运移,在受到阿拉善块体和鄂尔多斯盆地的阻拦后沉积下来。综上,板块运动造成的大规模运动调节与地壳深浅部的相互作用共同促使了该地区地震的多发。

关键词:积石山地震;布格重力异常;地壳密度结构;深部构造特征;孕震环境

中图分类号:P315 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-14

DOI:10.13203/j.whugis20240085 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0356-12

Deep Structural Characteristics and Dynamic Processes of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake and Its Adjacent Areas

PANG Qipei[1] *WU Yunlong*[1,2] *XU Jingtian*[1] *SHI Xuguo*[1] *ZHANG Yi*[2]

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

2 Key Laboratory of Geological Survey and Evaluation of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: **Objectives**: On December 18, 2023, an Ms 6.2 earthquake occurred in Jishishan County, Gansu Province. The breeding and occurrence of strong earthquakes are controlled by the regional stress field and the main active fault zone, as well as the deep physical structure and dynamic environment. It is of great significance to study the deep structure characteristics and seismogenic environment in the focal area and its adjacent areas to reveal the causes of strong earthquakes and to carry out the work of earthquake prevention and disaster reduction. **Methods**: Based on the XGM2019e global gravity field model, the Bouguer gravity anomaly data are processed and analyzed by using wavelet multi-scale analysis and three-dimensional crustal density structure inversion, and the deep structural characteristics and dynamics processes in the study area are analyzed from the perspective of gravity mechanics. **Results**: The Bouguer gravity anomaly in the focal area and its adjacent areas is a negative anomaly, and the variation range is between -170 -- -530 mGal. The tectonic movement in the upper and middle crust of this region is active, and a complex

基金项目:国家自然科学基金(42274111, 41931074, 42374032)。

第一作者:庞琪沛,硕士生,研究方向为重力反演。pqp0111@163.com

通信作者:徐景田,教授。121446591@qq.com

phenomenon of high-density and low-density bodies appears inside the crust. This area is in an arc-shaped gravity gradient belt between the Alxa block, Ordos block and the Tibetan Plateau block. The calculation results show that the Tibetan Plateau material migrated eastward under the influence of plate collision and was deposited after being obstructed by the Alxa block and Ordos Basin. **Conclusions**: The large-scale motion adjustment caused by plate movement and the interaction between the deep and shallow parts of the crust have contributed to the frequent earthquakes in this region.

Key words: Jishishan Ms 6.2 earthquake; Bouguer gravity anomaly; crustal density structure; deep structural characteristics; seismogenic environment

据中国地震台网测定，2023-12-18T23：59：30 在甘肃临夏回族自治州积石山县发生 Ms 6.2 地震，震源深度 10 km，震中位于 35.70°N，102.79°E。震后发生多次余震，截至 2023-12-20，共记录余震 423 次，其中 3 级及以上余震 10 次，最大余震为 19 日 0 时 59 分发生的 4.1 级余震。截至 2023-12-25，地震已造成 149 人遇难、2 人失联，该地震是 2023 年造成我国人员伤亡最严重的地震。

地震发生以来，多位学者及时展开了相关研究。陈博等[1]利用多源遥感解译、合成孔径雷达干涉测量（interferometric synthetic aperture radar，InSAR）相干性变化等多种方法，开展了积石山地震同震滑坡易发性评估、同震滑坡快速识别和震后房屋损毁情况等工作，并进行了野外验证；黄观文等[2]利用实时全球导航卫星系统（global navigation satellite system，GNSS）和加速度数据对同震灾害链中远场易发区滑坡潜在危害性进行了评估；方楠等[3]联合 InSAR 和地震波数据反演了积石山地震的断层几何参数、同震滑动分布及其破裂过程，分析了发震构造和孕震机制；此外，也有团队基于 InSAR 观测计算了积石山地震的同震形变，反演了发震断层几何结构和滑动分布，探讨了周边断层未来的地震危险性[4-5]。

此次积石山地震发生在柴达木-祁连地块东北缘，拉脊山断裂南段，西接右旋的日月山断裂带，东接左旋的西秦岭断裂带[6]，李智敏等[7]的研究表明，该区域曾发生过两次强烈的古地震，地震事件与喇家文化的毁灭有密切的联系。已有的研究表明，此次积石山 Ms 6.2 地震为低倾角逆冲兼右旋走滑型地震，破裂持续时间约 8 s[8-9]。强震发生是受局部应力场、主要活动断裂带、深层物理结构和动态环境控制的复杂物理过程[10]。因此，调查震源区域及其周边地区的深部构造特性和动力学过程，对于研究该地区深部孕震环境具有重大意义。

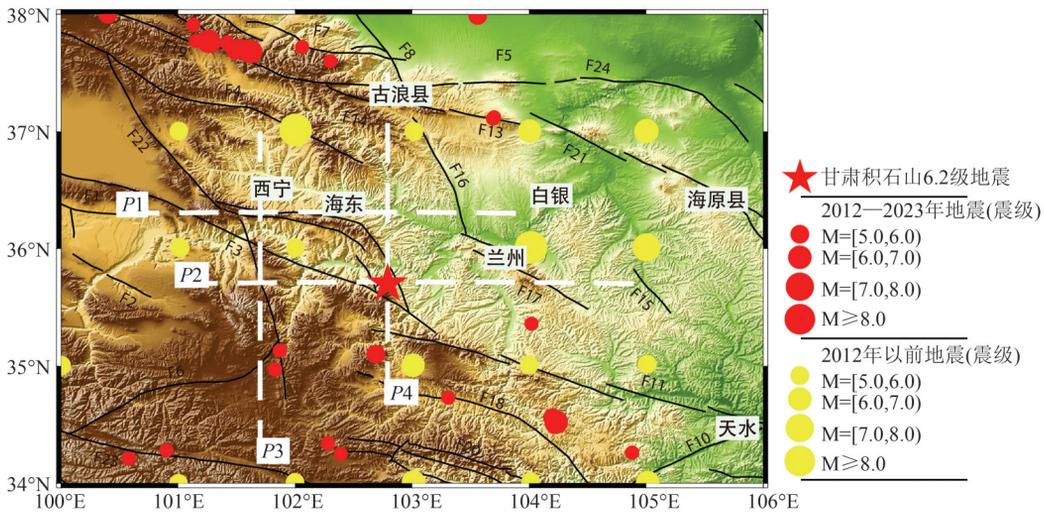
地震的发生与地壳内部断裂带分布情况及其活动性紧密相关，通过分析地壳密度结构特征来研究地下物质活动性的规律是研究地球深部构造的常用手段[11-12]。重力异常反映的是由于物质密度分布不匀而引起的重力的变化，利用重力数据来获取地壳密度分布情况也是构建地壳密度结构的重要方法。此外，重力异常的分布情况能够直观地反映地壳深部结构以及构造活动等，可为研究地球深部构造特征和动力学过程提供科学依据[13-14]。本文利用 XGM2019e 全球重力场模型，得到了震源及邻区的重力异常，并基于小波多尺度分析和三维地壳密度结构反演等方法对重力异常数据进行了处理和分析，从重力学的角度分析了研究区域深部构造特征和动力学过程，为理解该区域深部孕震机制和评估未来地震活动趋势提供了科学参考。

1　研究区域构造背景

积石山 Ms 6.2 地震发生在位于青藏高原东北缘的柴达木-祁连地块，块体边界由海源断裂、东昆仑断裂和阿尔金断裂 3 条大型左旋走滑断裂组成[15]。块体内部又被西秦岭北缘断裂、日月山断裂等 NW 走向断裂带以及庄浪河断裂、六盘山断裂等一系列 NNW 走向断裂带分割为菱形次级块体，这些块体主要以右旋走滑性质为主[16]。研究区域内大型活动断裂带的存在调节着其地壳稳定性，随着各断裂产生作用导致深部构造运动频繁，使得地震活动较为剧烈，且多以 5～6 级地震为主。研究区域断裂带分布及历史地震事件如图 1 所示，其中白线表示本文中所设置的 4 条剖面，黑线表示断裂带。

从图 1 的区域构造和震中位置可看出，此次地震发震断裂为拉脊山断裂，该断裂介于左旋走滑的西秦岭断裂与右旋走滑的日月山断裂之间，是柴达木-祁连块体东部的逆冲性活动断裂。拉脊山断裂由南、北两段组成，南段由 NW 走向的逆冲断裂组成，主要包含积石山东缘断裂和积石山西缘断裂，其形成于 13 Ma[17]；北段由近 EW 走

向的左旋逆冲断裂组成,其形成于11 Ma[18]。震中附近100 km范围内记录到15次破坏性地震,其中4.7～4.9级地震1次,5.0～5.9级地震11次,6.0～6.9级地震2次,7.0～7.9级地震1次。



注:F1:共和盆地北缘断裂;F2:共和盆地南缘断裂;F3:青海南山-循化南山断裂;F4:达坂山断裂;F5:天桥沟-黄羊川断裂;F6:军功断裂;F7:昌马-俄博断裂;F8:武威-天祝断裂;F9:拉脊山断裂;F10:礼县-罗家堡断裂;F11:西秦岭北缘断裂;F12:六盘山断裂;F13:老虎山断裂;F14:金强河断裂;F15:会宁-义岗断裂;F16:庄浪河断裂;F17:马衔山断裂;F18:临潭-宕昌断裂;F19:托莱山断裂;F20:光盖山-迭山北麓断裂;F21:海源断裂;F22:日月山断裂;F23:东昆仑断裂;F24:香山-天景山断裂;F25:迭部-白龙江断裂。

图1 甘肃省积石山地震区域构造图

Fig. 1 Tectonic Map of Jishishan Earthquake, Gansu Province

2 数据与方法

布格重力异常包含了地壳内部各种密度不均匀体所引起的重力异常,也包含了莫霍面起伏带来的巨大盈余或亏损,通过分析其分布情况可以直观地反映地壳内部地质体的分布以及深部构造特征等信息[19]。随着卫星重力观测技术的发展,特别是GRACE(gravity recovery and climate experiment)和GOCE(gravity field and steady-state ocean circulation explorer)等重力卫星计划的陆续实施,全球重力场模型的质量有了显著的提高[20-21]。本文所使用到的数据来源于XGM2019e地球重力场模型,XGM2019e是一个组合的全球重力场模型。其数据源包括较长波长范围内的GOCO06s卫星模型,以及较短波长的地面观测数据。地面数据包括美国国家地理空间情报局提供的15′地面重力异常数据集,以及由海洋测高和大陆地形得出的重力异常组成的增强数据集,这些增强数据集的加入使XGM2019e模型的计算能够达到2′的空间分辨率[22]。由于重力场是岩石圈不同场源信息的叠加场,这使得原始重力场中所包含的信息十分混杂,不易分辨。因此,需对重力异常数据进行不同的处理以满足地质构造解译的需求,本文中所用到的重力异常数据处理方法包括小波多尺度分析方法和地壳密度反演方法等,下面简要介绍相关方法的原理。

2.1 小波多尺度分析

重力异常是由地下所有密度不均匀引起的叠加异常,包含了不同深度、不同尺度的各种重力场源。本文利用小波多尺度分析方法将所得的重力异常分解为不同尺度的细节场,以便于更好地进行地质解释[23]。利用该方法可按照不同的频率来分解布格重力异常,再结合径向对数功率谱分析得到对应的等效场源深度,从而反映出不同深度下重力异常的细节变化。

根据小波分析理论,二维重力异常场表示为:

$$g(x,y)=f(x,y) \tag{1}$$

对重力异常进行N阶分解,可得到N个正交子空间,A_n表示N阶逼近,D_n表示N阶细节,重力异常分解表达式可表示为:

$$g(x,y)=A_n g(x,y)+D_n g(x,y)+D_{n-1}g(x,y)+\cdots+D_2 g(x,y)+D_1 g(x,y) \tag{2}$$

式(2)可简写为:

$$g(x,y)=A_n f(x,y)+\sum_{i=1}^{n} D_i f(x,y) \tag{3}$$

式中,$A_n f(x,y)$表示n阶小波逼近;$D_n f(x,y)$表示n阶小波细节。对分解后的布格重力异常场进行径向对数功率谱分析[24],以定量估计各异常场源的平均深度。极坐标系下径向功率谱及场源埋深深度表达式为:

$$\ln E(k)=\ln A^2-2hk \tag{4}$$

式中，$\ln E(k)$为径向对数功率；A为尺度系数；h为等效源深度；k为波数。利用最小二乘法进行拟合，直线的斜率即为等效源深度，x_1、x_2表示直线上的两个横坐标，则h为：

$$h=\frac{\ln(x_1)-\ln(x_2)}{2(x_1-x_2)} \tag{5}$$

2.2　剖面地壳密度结构反演

为了获取研究区域地壳内部各地层厚度分布等深部信息，利用 Oasis Montaj 平台下的 GM-SYS(gravity/magnetic modeling software)软件来进行反演计算[25]。其计算步骤如下：(1)根据计算得到的重力异常数据和 CRUST1.0 全球地壳模型作为先验信息；(2)利用 GM-SYS 软件，根据建立的初始地壳密度模型计算其对应的布格重力异常，以基于实测重力数据计算得到的布格重力异常数据为拟合标准，利用软件进行地壳密度结构的反演计算；(3)对反演得到的地壳密度结构进行修正，重复上述步骤，直到正演出的重力异常值与计算得到的实测重力异常值相拟合。

2.3　三维地壳密度反演

本文使用到的三维地壳密度反演方法是基于 Li 和 Oldenburg 重力反演算法[26-28]，采用拉格朗日乘子法作为约束，反演目标区域的三维地壳密度分布[29]。该方法的原理是将研究区域划分为一系列密度恒定的长方体单元，在对布格重力异常进行分离得到局部重力异常后，以研究区域浅层的地壳密度作为约束，经过迭代优化得到最优解的过程。Li 和 Oldenburg 提出的反演目标函数如下：

$$\min:\phi(m)=\phi_d+\mu\phi_m \tag{6}$$

式中，ϕ_d为数据拟合差；μ为正则化参数；ϕ_m为模型目标函数；$\phi(m)$为反演目标函数。此外，对每个单元块体进行约束，引入松弛变量函数：

$$s_i(m,z)=s_i(m)+z_i^2=0 \tag{7}$$

式中，$s_i(m,z)$为松弛变量函数；z_i为每个单元的松弛变量；$s_i(m)$为约束函数，

$$s_i(m)=\begin{cases}m-m_0, m=m_0\\ m_1-m, m>m_2\\ m-m_2, m<m_2\end{cases} \tag{8}$$

式中，m_0、m_1和m_2分别表示物性约束中的等值、下界和上界。引入罚函数和拉格朗日乘子，本文所使用到的反演目标函数如下：

$$\min:F(m,z)=\phi(m)+\sum_{i=1}^{N_z}\lambda_i\left[s_i(m)+z_i^2\right]+\cdots+\frac{M}{2}\sum_{i=1}^{N_z}\left[s_i(m)+z_i^2\right]^2 \tag{9}$$

式中，$F(m,z)$为最终的反演目标函数；M为惩罚函数；λ_i为拉格朗日乘子；N_Z为松弛变量个数。不断迭代式(9)，同时获得对应松弛变量和密度，直至得到最优解。

3　研究区域重力异常特征

3.1　布格重力异常

震源区及邻区布格重力异常整体表现为负异常，变化范围在－170～－530 mGal之间。整体变化趋势为自西向东、自南向北逐渐升高，并且存在明显的东西分区的情况(图2)。图2中黑线表示断裂带，白色虚线为块体边界线。研究区域西南侧为松潘-甘孜块体，表现出低值的负异常区，反映了青藏高原地块受到板块挤压表现出强烈的隆升趋势，地下物质向东流失。研究区域东北侧为阿拉善块体，该地块为相对坚硬的刚性地块，性质较为稳定，青藏高原块体流失的物质在此堆积使得该处重力异常值相对较高[30]。此外，图中还明显存在一条NW走向的重力梯度条带，其中包含海源断裂、西秦岭北缘断裂、香山-天景山断裂、日月山断裂等较大型的断裂带。该梯度条带分割阿拉善块体、鄂尔多斯块体和青藏高原块体，两侧重力异常存在巨大的落差，表明此处断裂带活动性较强，两侧块体构造运动剧烈，地震事件较为频发。此次甘肃积石山县6.2级地震就发生在该区域内，对比图1中的历史地震事件可以发现，研究区域内发生的7级以上大型地震多发生在该重力梯度条带范围内。

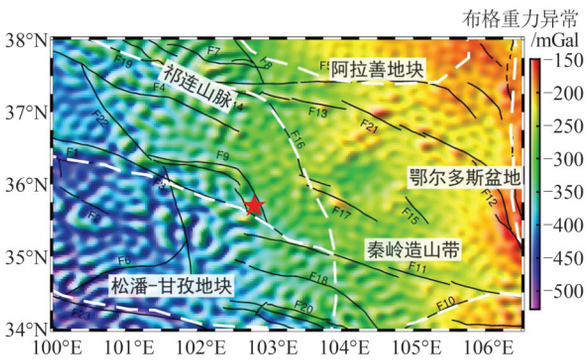


图2　震区布格重力异常分布图

Fig. 2　Distribution Map of Bouguer Gravity Anomaly in Earthquake Area

3.2　小波多尺度分析结果

根据前人的研究成果[31-33]，本文在进行小波多

尺度分析时综合考虑了小波基函数和研究区域布格重力异常波形的相似程度,以及分解阶次的选取情况。最终选择利用bior3.5小波基函数对研究区域的布格重力异常进行5阶分解,得到的1~5阶小波细节场如图3所示。此外,利用径向功率谱方法计算了各重力异常场所对应的场源深度(表1)。结果表明,1阶细节场和2阶细节场所对应场源深度分别为3.5 km和14.8 km,反映的是研究区域沉积层与上地壳的物质分布情况;3阶细节场和4阶细节场所对应场源深度分别为26.2 km和42.8 km,反映的是中下地壳的密度异常体分布情况;5阶的近似场源深度为58.4 km,对应莫霍面的起伏情况。根据近似深度,将对应震源深度的地震事件绘制在了小波细节图中(图3),红色圆圈表示有记录以来发生在研究区域的4级及以上地震事件,红色五角星表示此次积石山地震。

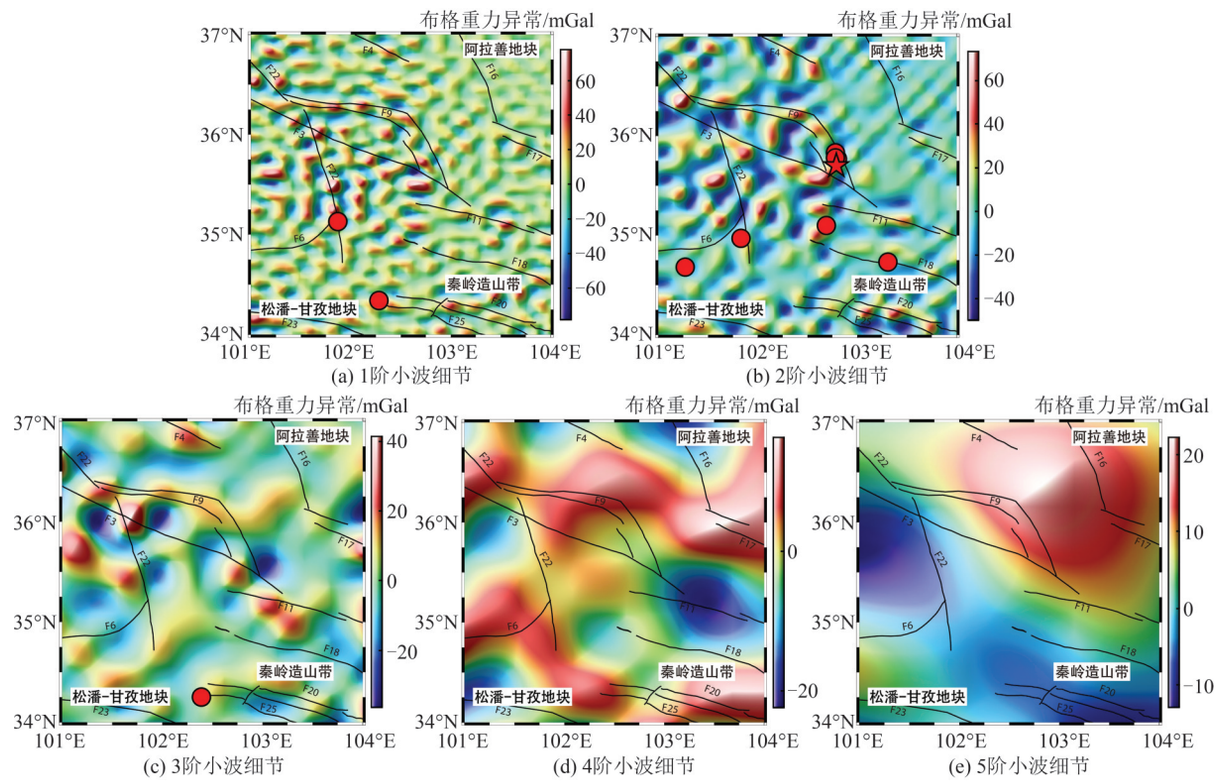


图3 震区布格重力异常1~5阶小波细节图

Fig. 3 1-5 Order Wavelet Transform Details of the Bouguer Gravity Anomalies on the Study Area

表1 1~5阶小波细节近似场源深度

Table 1 Approximated Source Depths of the 1-5 Order Wavelet Details

阶次	近似场源深度/km	对应地层
1	3.5	沉积层
2	14.8	上地壳
3	26.2	中地壳上层
4	42.8	中地壳下层
5	58.4	下地壳

研究区域沉积层与上地壳布格重力异常分布较为复杂,正负异常交替分布,变化范围在-60~50 mGal(图3(a)、3(b))。两者均为小尺度重力异常,以点状、珠状分布为主。从两幅图中能看到,各断裂所处的位置均处在正负重力异常交替的区域。在2阶细节场中能明显看到拉脊山断裂、庄浪河断裂等断裂带所处的位置表现为珠状异常,这表明这些断裂带埋深较浅,属于表层断裂带。浅部细节场的重力异常分布情况说明了该区域上地壳构造运动活跃、地震频发,使得地壳内部出现多个重力梯度带。此外,细节图中东北缘没有明显的重力梯度带,这也反映了阿拉善块体的刚体特性,说明该地区内部结构相对稳定。从图3(a)、3(b)中能够看到,发生在研究区域中的大部分地震事件,其震源深度多位于该深度上。

随着阶数的增大,其对应场源深度也逐渐加深,研究区域中上地壳的布格重力异常特征相比于前两阶,其尺度更大(图3(c)),能看到在该尺度下重力异常主要呈舌状和小椭圆形状分布。拉脊山断裂、庄浪河断裂、青海南山-循化南山断裂和临潭-宕昌断裂等仍是正负异常变化较为剧烈的区域,一方面说明这些地区地质构造活动变

化较为剧烈,另一方面也表明这几条断裂穿过地表到达了上地壳。

从图 3(d)可知,研究区域中下地壳小波细节场的尺度更加清晰,能看到重力异常有分区的趋势。其中松潘-甘孜地块东侧、西秦岭造山带存在椭圆形的负异常区域,相应的青藏高原东北缘与阿拉善地块西侧之间呈现出了一条正异常带。松潘-甘孜地块东侧的低异常区域与巴颜喀拉地块中存在较厚的低速、低阻层的观测结果一致[34]。两侧高异常区域可能是由于该地块下地壳温度较高,使得中下地壳的岩体熔融在周围中地壳堆积,产生较高的重力异常[35-36]。青藏高原物质向东运移的过程中受到四川盆地和阿拉善块体的阻拦产生堆积,从而呈现出正异常带,这也表明在该区域中下地壳内部物质之间可能存在的交互作用。

5阶小波细节场(图 3(e))反映的是研究区域下地壳的布格重力异常特征,可以明显看出重力异常存在分区的现象。西南方向的松潘-甘孜块体呈现明显的负异常,东北缘则表现为正异常。这可能是由于高原地壳物质因板块作用向东运动,西侧因为物质的损失布格重力异常表现为负异常,而鄂尔多斯块体、阿拉善块体等坚硬地块使得东流物质堆积下来,在研究区域东北侧呈现出正异常,这也为青藏高原东北缘"下地壳流"的动力学过程提供了证据[37]。此外,通过对应深度的地震分布图可以看到该区域所发生的地震大多为浅源地震,震源深度在 5～20 km 以内。

3.3　剖面地壳密度结构

基于前人的研究以及相关资料[38-40],本文将研究区域的地壳密度结构分为沉积层、上地壳、中地壳以及下地壳。利用 GM-SYS 软件对图 1 中东西走向的 *P*1、*P*2 剖面和南北走向的 *P*3、*P*4 剖面进行了人机交互重力密度拟合反演,最终反演得到的剖面地壳密度图如图 4 所示,其中布格重力异常表示本文中正演得到的布格重力异常结果与观测得到的布格重力异常数据之间的拟合程度;*P*1 剖面演算值与观测值的均方根误差为 1.278 mGal,*P*2 剖面为 1.298 mGal,*P*3 剖面为 1.118 mGal,*P*4 剖面为 0.868 mGal,演算结果与观测数据之间的拟合程度较高。

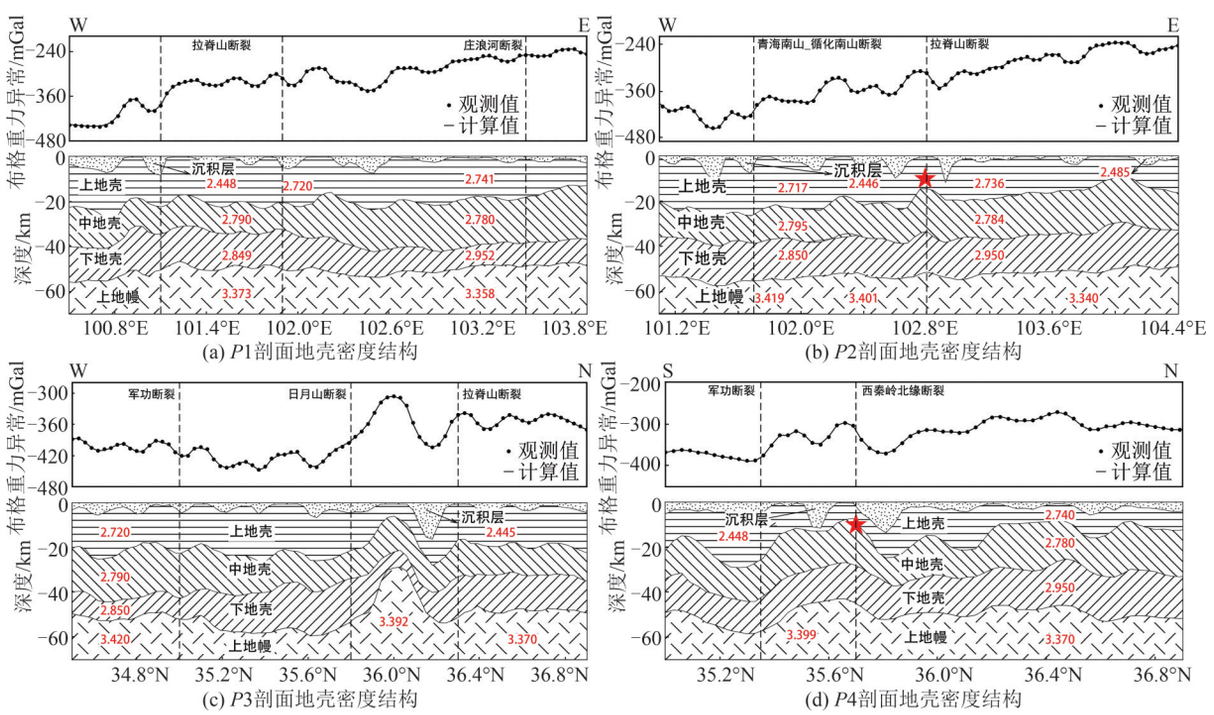


图 4　*P*1、*P*2、*P*3、*P*4 剖面地壳密度结构

Fig. 4　Crustal Density Structure in *P*1, *P*2, *P*3 and *P*4 Profiles

*P*1 剖面为东西走向剖面,自西向东横跨拉脊山断裂与庄浪河断裂,其中有一段与拉脊山断裂的弧形段重合。从反演结果可知,该剖面沉积层深度为 0.156～8.210 km,密度为 2.448 g/cm^3;上地壳深度为 12～27 km,密度为 2.720～2.741 g/cm^3;中地壳深度为 30～42 km,密度为 2.780～2.790 g/cm^3;莫霍面深度在 46～56 km,下地壳密度为 2.849～2.952 g/cm^3,上地幔密度在 3.358～3.373 g/cm^3(图 4(a))。剖面下方断裂带所在位置下地壳物质有明显的上隆趋势,拉脊山断裂一段其地壳深度明显浅于两侧。

*P*2 剖面也是东西向剖面,且经过此次积石山地震震源位置。剖面图能看到其沉积层深度为

0.11～11.6 km,密度为2.446～2.485 g/cm^3;上地壳深度为9～26 km,密度为2.717～2.736 g/cm^3;中地壳深度为29～40 km,密度为2.784～2.795 g/cm^3;莫霍面深度在48～57 km,下地壳密度为2.850～2.950 g/cm^3,上地幔密度在3.340～3.419 g/cm^3。从图4(b)能够看到震源西侧存在一块高密度异常区域,且埋深较浅。该剖面莫霍面自西向东逐渐变浅,是高原物质东移的反映。

*P*3剖面自南向北横跨军功断裂、日月山断裂和拉脊山断裂。沉积层深度为0.337～16.133 km,密度为2.445 g/cm^3;上地壳深度为5～28 km,密度为2.720 g/cm^3;中地壳深度为21～44 km,密度为2.790 g/cm^3;莫霍面深度在39～59 km,下地壳密度为2.850 g/cm^3,上地幔密度在3.370～3.420 g/cm^3。从图4(c)剖面图中能看到,在日月山断裂与拉脊山断裂所在位置地壳内部物质存在大幅度的隆起和沉降,其变化趋势较大,表明断裂带的活动性较强。

*P*4剖面是南北走向,经过震源所在区域,其沉积层深度为0.263～13.5 km,密度为2.448 g/cm^3;上地壳深度为7～29 km,密度为2.740 g/cm^3;中地壳深度为25～44 km,密度为2.780 g/cm^3;莫霍面深度在43～58 km,下地壳密度为2.950 g/cm^3,上地幔密度在3.370～3.399 g/cm^3。同*P*2剖面一样,从图4(d)剖面图中也能看到在震源南侧存在一处高密度异常区域,表明地震发生的位置地壳物质交换较为剧烈,断裂带活动性强。该剖面经过的几条断裂带也是存在隆起现象。

研究区域反演后的地壳密度结构如表2所示。通过4条剖面地壳密度结构能够发现,研究区域莫霍面整体上轻微地向东北方向变浅,以及各断裂带出现的中、下地壳物质交换的现象都可以合理地解释为青藏高原深部物质东流,并在向上运移的过程中受到刚性地块的阻挡而沉积下来。此外,日月山断裂、拉脊山断裂等断裂带的活动性较强,是地震易发的区域。对比图1中的历史地震记录,在研究区域内的一些断裂带处存在较大的地层落差,这些地区往往地震频发,此次积石山地震也是发生在该区域。

3.4 三维地壳密度结构

进行三维密度反演时,首先需将由莫霍面产生的区域重力异常分离出来,仅对得到的局部重力异常进行反演。这是因为观测获得的重力异常是由密度异常体在不同的深度和形态上叠加而成,其中包含的信息十分繁杂。为了实现三维密度反演,需要将莫霍面等相对较深的地质因素产生的异常从叠加重力异常中分离出来,再进行反演。本文利用小波多尺度分析方法对研究区域的布格重力异常进行了分解处理[41]。

表2 研究区域地壳密度结构

Table 2 Crustal Density Structure in the Study Area

地层	深度/km	密度/(g·cm^{-3})
沉积层	0～5	2.445～2.485
上地壳	10～29	2.717～2.741
中地壳	21～44	2.780～2.795
下地壳	39～59	2.849～2.952
上地幔顶部	—	3.340～3.420

反演区域东西向长度为340 km,南北向长度为420 km。因积石山地震震源深度为10 km,所以本文反演深度选为20 km。根据式(9),反演过程中惩罚因子初始值设为1×10^{-6},深度加权函数系数设为2,反演迭代收敛阈值设置为1×10^{-8}。代入不同的正则化参数进行迭代计算,并利用结果绘制了Tikhonov曲线,选用拐点处的正则化参数以保证反演结果最优。将反演得到的三维地壳密度结构按不同深度进行剖分,得到图5所示的地下密度结构分布图,其中黑线表示断裂带,红色五角星表示积石山地震震源所在位置,条带表示各区域对应的密度值。

从图5(a)可见,地下3 km处地壳密度结构以大面积的低密度分布为主,拉脊山断裂、日月山断裂、西秦岭北缘断裂等断裂带表现为点、珠状高密度异常分布,一方面表明这些断裂带埋深较浅,属于表层断裂带,这与1阶细节场的结果一致(图3(a)),另一方面也说明了这些断裂带的活动性较强。

从图5(b)可见,地下5 km处的地壳密度分布存在分区的迹象,东北侧密度分布较为均匀,表明其地块内部结构相对稳定;西南侧密度分布情况较为杂乱,说明深部构造活动剧烈,这是青藏高原深部物质东移过程中受到刚性块体阻挡而沉积下来所反映出来的现象。从图5(b)中能明显看到各断裂带的分布情况,且伴随着大面积的高密度异常分布,这是该区域地壳深浅物质交换的重要证据。

此次积石山地震的震源深度为10 km,该深度的地壳密度分布较为杂乱(图5(c)、5(d))。从成像结果中来看,震源所在位置处于高密度物质和低密度物质混杂的区域,对比图2布格重力异常分布图,该区域属于大范围的重力梯度条带。从浅层的地

壳密度结构图中也能说明该区域断裂带活动性较强,两侧块体构造运动剧烈,并且其上下地壳物质交换较为频繁(图 5(a)、5(b)),这是该区域地震易发的重要因素。此外,在该深度上研究区域东北侧也逐渐出现大面积的高密度异常区域,这也是高原高密度物质向东运移的表现。

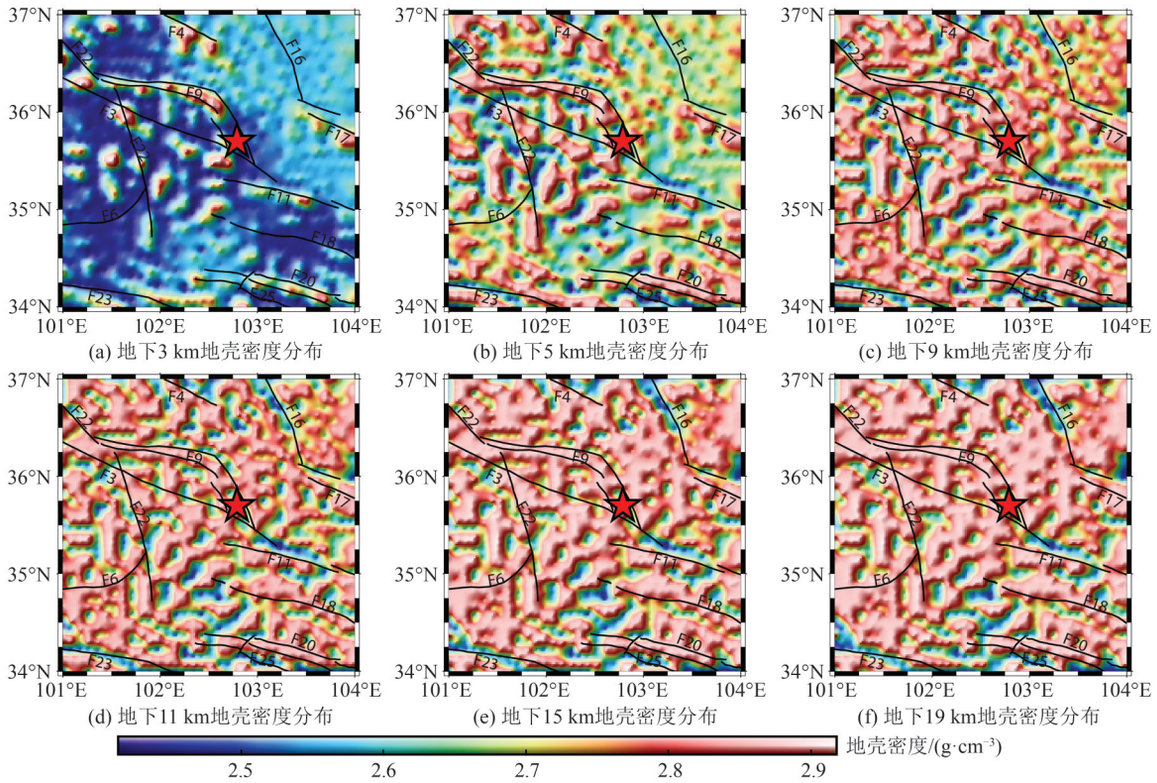


图 5　三维地壳密度反演结果

Fig. 5　Three-Dimensional Crustal Density Inversion Results

地下 15 km 和 19 km 的地壳密度反演结果差异较小(图 5(e)、5(f))。根据剖面反演结果来看,该深度所对应的底层是上中地壳,在该地层研究区域表现为大面积的高密度区域,这是下地壳高密度物质受热熔融后上涌至中上地壳的有力证据。从图中能够看到,高密度异常区域多位于西秦岭北缘断裂、庄浪河断裂和东昆仑断裂等断裂带所在位置,这也说明了该区域地壳下地壳高密度物质可能是沿着断裂通道上涌至中上地壳发生聚集。

4　讨　论

4.1　研究区域孕震环境

地震的发生是在区域构造运动作用下,应变在活动断裂带上不断积累并达到极限状态后而突发失稳破裂的结果[42-43]。研究区域位于青藏高原东北缘,该区域所发生的地震多为5级左右的中强性地震,且大多为浅源地震,震源深度在5～20 km以内(图 3)。从图 2震区的布格重力异常分布中可以看到,该区域的大型地震多发生在青藏高原块体、阿拉善块体和鄂尔多斯盆地之间较为宽缓的重力梯度带上,该重力梯度带是由海源断裂带、香山-天景山断裂、烟囱山断裂和牛首山-六盘山断裂组成的弧形重力梯度条带。当青藏高原受板块碰撞影响向东北挤压阿拉善块体和鄂尔多斯盆地时,受到两个刚性地块的阻挡,交界区域内部物质不断调整沉积,使得地壳内部出现高、低密度体错综复杂的现象(图 5)。

重力异常小波多尺度分析的结果表明(图 3),发生在研究区域内的大型地震基本都是位于正负重力异常交替的梯度带上,而位于块体交界处的大型重力梯度带更是孕育了多次 6～7 级的大型地震。从图 5的结果中可以看到,在该大型重力梯度带所在位置,其中上地壳存在高密度物质和低密度物质混杂的情况,这是青藏高原深部东移扩张的有力证据。同时,从 4、5阶小波细节图的结果中可以得出(图 3(d)、3(e)),该区域下地壳表现为均匀的低布格重力异常,这种相对稳定的深部构造条件可能导致更深处的应力不易累积在该处,反而逃逸向中上地壳,从而使得上方的重力梯度带具备深部强震孕育条件。因此,深

部地壳构造运动与地壳深浅部的相互作用共同促使了该区域的地震频发。

4.2 研究区域动力学过程

目前,有关青藏高原东北缘的动力学模式,大部分学者主要认同“下地壳流”的观点[44-45]。从图3(e)中能够看到,5阶细节图中青藏高原块体物质的东流主要发生在下地壳。随着印度-亚欧板块的碰撞,青藏高原向上隆升,地壳逐渐增厚受到两侧刚性块体的阻挡,使其进行东西向挤出运动。从反演得到的地壳密度结构中可以看到(图5),研究区域西南侧中上地壳表现为大范围的高密度异常,这可能是由于板块挤压产生了巨大的热量,使得上地幔和下地壳岩石熔融上涌,高密度物质上涌至中上地壳[46]。同时,使得小波细节图中中上地壳表现为正异常,而下地壳表现为负异常,这也能较好的吻合“下地壳流”模式。

5 结 语

本文基于XGM2019e全球重力模型,利用小波多尺度分析和地壳密度反演等方法,对甘肃积石山Ms 6.2地震所在的周边地区进行了计算和分析,反演了地壳密度结构,结合布格重力异常的分解结果探讨了该区域动力学特征与深部孕震环境,得到以下几点结论:

1)研究区域布格重力异常整体表现为负异常,变化范围在-170~-530 mGal之间。整体变化趋势为自西向东、自南向北逐渐升高,并且存在明显的东西分区的情况,重力异常的走向与断裂构造的走向基本一致。阿拉善块体、鄂尔多斯块体和青藏高原块体之间存在一条宽缓的弧形重力梯度条带,其两侧重力异常存在巨大的落差,表明此处断裂带活动性较强,两侧块体构造运动剧烈。

2)小波多尺度分析方法得到的重力异常细节图表明,研究区域地壳浅部布格重力异常分布较为杂乱,说明了该区域上中地壳构造运动活跃,使得地壳内部出现多个重力梯度带;从深部小波细节图可以明显看出布格重力异常存在分区的现象,西南方向的青藏高原块体呈现明显的负异常,而东北缘则表现为正异常,这反映了青藏高原物质向东运移的过程中受到阿拉善块体和鄂尔多斯盆地的阻拦产生堆积。

3)研究区域莫霍面整体上轻微地向东北方向变浅,布格重力异常场中的弧形重力梯度条带在地壳密度反演结果中表现为高、低密度混杂,这说明该区域断裂带活动性较强,两侧块体构造运动剧烈,并且其上下地壳物质交换较为频繁。同时,研究区域东北缘地壳密度随深度加深逐渐表现为大面积的高密度异常,这也佐证了高原物质东移受阻后堆积的结论。

4)此次地震所在的区域位于青藏高原块体、阿拉善块体和鄂尔多斯盆地之间较为宽缓的重力梯度条带上,根据各尺度下布格重力异常分布情况和地壳密度结构反演结果,板块碰撞导致的高原物质东移沉积,以及地壳深浅部物质存在大规模相互作用使得该区域具备强震的深部孕震环境,促使了中强地震的频发。

参 考 文 献

[1] 陈博, 宋闯, 陈毅, 等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis 20230497.
CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230497.

[2] 黄观文, 景策, 李东旭, 等. 甘肃积石山Ms 6.2地震对滑坡易发区的变形影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI:10.13203/J.whugis20230490.
HUANG Guanwen, JING Ce, LI Dongxu, et al. Deformation Analysis of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake on the Landslide Hazard Areas[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI:10.13203/J.whugis20230490.

[3] 方楠, 孙凯, 黄传超, 等. 联合InSAR和地震波数据反演甘肃积石山Ms 6.2地震震源时空破裂过程[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240036.
FANG Nan, SUN Kai, HUANG Chuanchao, et al. Joint Inversion of InSAR and Seismic Data for the Kinematic Rupture Process of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240036.

[4] 杨九元, 温扬茂, 许才军. InSAR观测揭示的2023年甘肃积石山Ms 6.2地震发震构造[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230501.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Seis-

mogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu) Earthquake Revealed by InSAR Observations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20230501.

[5] 刘振江, 韩炳权, 能懿菡,等. InSAR观测约束下的2023年甘肃积石山地震震源参数及其滑动分布[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240008.
LIU Zhenjiang, HAN Bingquan, NAI Yihan, et al. Source Parameters and Slip Distribution of the 2023 Mw 6.0 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Constrained by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240008.

[6] 王世广, 胥广银, 李帅,等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震序列及发震构造分析[J]. 地震学报, 2024, 46(6): 953-968.
WANG Shiguang, XU Guangyin, LI Shuai, et al. Analysis of Earthquake Sequence and Seismogenic Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake, Gansu Province, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2024, 46(6): 953-968..

[7] 李智敏, 李延京, 田勤俭, 等. 拉脊山断裂古地震与喇家遗址灾变事件关系研究[J]. 地震研究, 2014, 37(S1): 109-115.
LI Zhimin, LI Yanjing, TIAN Qinjian, et al. Study on the Relationship Between Paleoseismic on Laji Mountain Fault and Catastrophic Event on Lajiashan Site[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(S1): 109-115.

[8] 甘肃临夏M 6.2地震震源破裂过程反演初步结果[EB/OL]. (2023-12-19). https://mp.weixin.qq.com/s/SuKbTgq8-0EV2F bNcdlYqQ.
Preliminary Results of the Inversion of the Rupture Process of the Seismic Source of the Gansu Linxia M 6.2 Magnitude Earthquake [EB/OL]. (2023-12-19). https://mp.weixin.qq.com/s/SuKbTgq8-0EV2FbNcdlYqQ.

[9] 郭祥云, 韩立波, 张旭, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源参数和破裂特征[J]. 地震科学进展, 2024, 54(1): 75-85.
GUO Xiangyun, HAN Libo, ZHANG Xu, et al. Source Parameters and Rupture Characteristics of the M 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province on December 18, 2023[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2024, 54(1): 75-85.

[10] 陈兆辉, 刘金钊, 张双喜, 等. 苍梧Ms 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, 2020, 40(2): 175-181.
CHEN Zhaohui, LIU Jinzhao, ZHANG Shuangxi, et al. Multiscale Gravity Field Analysis and Dynamic Significance of Seismogenic Environment in Cangwu Ms 5.4 Earthquake, China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2020, 40(2): 175-181.

[11] 李莹, 田建慧, 李心怡, 等. 2022年9月5日四川泸定Ms 6.8地震深部构造特征[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1385-1396.
LI Ying, TIAN Jianhui, LI Xinyi, et al. Deep Tectonic Pattern of the Luding Ms 6.8 Earthquake on 5th September 2022 in Sichuan Province, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1385-1396.

[12] 王泽, 吴云龙, 张毅, 等. 巴东-秭归地区地壳密度反演及其构造特征[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1763-1770.
WANG Ze, WU Yunlong, ZHANG Yi, et al. Crustal Density Inversion and Its Tectonic Structure in Badong-Zigui Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1763-1770.

[13] 王鑫, 张景发, 姜文亮, 等. 基于布格重力数据研究郯庐断裂带江苏段深部构造[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(4): 1516-1525.
WANG Xin, ZHANG Jingfa, JIANG Wenliang, et al. Deep Structures of Jiangsu Segment of Tan-Lu Fault Zone Derived from Bouguer Gravity Data[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(4): 1516-1525.

[14] 陈石, 王青华, 王谦身, 等. 云南鲁甸Ms 6.5地震震源区和周边三维密度结构及重力场变化[J]. 地球物理学报, 2014, 57(9): 3080-3090.
CHEN Shi, WANG Qinghua, WANG Qianshen, et al. The 3D Density Structure and Gravity Change of Ludian Ms 6.5 Yunnan Epicenter and Surrounding Regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(9): 3080-3090.

[15] 郑文俊, 张博譞, 袁道阳, 等. 阿拉善地块南缘构造活动特征与青藏高原东北缘向外扩展的最新边界[J]. 地球科学与环境学报, 2021, 43(2): 224-236.
ZHENG Wenjun, ZHANG Boxuan, YUAN Daoyang, et al. Tectonic Activity in the Southern Alashan Block and the Latest Boundary of Outward Expansion on the Northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2021, 43(2): 224-236.

[16] 杨攀新, 熊仁伟, 胡朝忠, 等. 2023年甘肃积石山6.2级地震发震构造浅析[J]. 地震, 2024, 44(1): 153-159.
YANG Panxin, XIONG Renwei, HU Chaozhong, et al. Preliminary Analysis of the Seismogenic Tec-

tonics for the 2023 Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province[J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 153-159.

[17] LEASE R O, BURBANK D W, CLARK M K, et al. Middle Miocene Reorganization of Deformation Along the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology*, 2011, 39(4): 359-362.

[18] YUAN D Y, GE W P, CHEN Z W, et al. The Growth of Northeastern Tibet and Its Relevance to Large-Scale Continental Geodynamics: A Review of Recent Studies[J]. *Tectonics*, 2013, 32(5): 1358-1370.

[19] 王鑫, 姜文亮, 张景发, 等. 青藏高原东北缘重力场深部结构及其动力学特征[J]. 地球物理学报, 2020, 63(3): 988-1001.
WANG Xin, JIANG Wenliang, ZHANG Jingfa, et al. Deep Structure of the Gravity Field and Dynamic Characteristics of the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(3): 988-1001.

[20] DRINKWATER M R, FLOBERGHAGEN R, HAAGMANS R, et al. GOCE: ESA's First Earth Explorer Core Mission[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003.

[21] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, et al. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): L09607.

[22] ZINGERLE P, PAIL R, GRUBER T, et al. The Combined Global Gravity Field Model XGM2019e[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(7): 66.

[23] 陈兆辉, 陈石, 张双喜, 等. 青藏高原东南缘多尺度重力场及构造含义[J]. 地震, 2021, 41(1): 25-39.
CHEN Zhaohui, CHEN Shi, ZHANG Shuangxi, et al. Multi-scale Gravity Field of Southeastern Tibetan Plateau and Its Tectonic Significance[J]. *Earthquake*, 2021, 41(1): 25-39.

[24] SPECTOR A, GRANT F S. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data[J]. *Geophysics*, 1970, 35: 293-302.

[25] 郭凌冬, 付广裕, 佘雅文, 等. 雅鲁藏布江桑日—墨脱段岩石圈均衡研究以及虚拟水库诱发地震危险性分析[J]. 地球物理学报, 2021, 64(9): 3220-3231.
GUO Lingdong, FU Guangyu, SHE Yawen, et al. Lithosphericisostasy and Risk of Reservoir-Induced Earthquakes Along the Yarlung Zangbo River Between Sangri and Mêdog[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3220-3231.

[26] LI Y G, OLDENBURG D W. 3-D Inversion of Magnetic Data[J]. *Geophysics*, 1996, 61(2): 394-408.

[27] LI Y G, OLDENBURG D. 3-D Inversion of Gravity Data[J]. *Geophysics*, 1998, 63(1): 109-119.

[28] OLDENBURG D W. The Inversion and Interpretation of Gravity Anomalies[J]. *Geophysics*, 1974, 39(4): 526.

[29] ZHANG Y, YAN J G, LI F, et al. A New Bound Constraints Method for 3-D Potential Field Data Inversion Using Lagrangian Multipliers[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 201(1): 267-275.

[30] 张站稳, 高国明, 王树琴, 等. 青藏高原东北缘及其邻区重力异常小波多尺度特征分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 866-874.
ZHANG Zhanwen, GAO Guoming, WANG Shuqin, et al. Study on the Transverse Variation Characteristics of Gravity Anomalies in the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Adjacent Areas, Based on Wavelet Multi-scale Analysis[J]. *Journal of Yunnan University* (*Natural Sciences Edition*), 2023, 45(4): 866-874.

[31] 李健, 周云轩, 许惠平. 重力场数据处理中小波母函数的选择[J]. 物探与化探, 2001, 25(6): 410-417.
LI Jian, ZHOU Yunxuan, XU Huiping. The Selection of Wavelet Generating Functions in Data-Processing of Gravity Field[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2001, 25(6): 410-417.

[32] 方东, 胡敏章, 郝洪涛. 青藏高原东南缘重力场多尺度分析及其构造含义[J]. 地震地质, 2021, 43(5): 1208-1232.
FANG Dong, HU Minzhang, HAO Hongtao. Multi-scale Analysis of the Gravity Field in the Southeastern Qinghai-Tibet Plateau and Its Tectonic Implications[J]. *Seismology and Geology*, 2021, 43(5): 1208-1232.

[33] 刁博, 王家林, 程顺有. 重力异常小波多分辨分析分解阶次的确定[J]. 地球科学, 2007, 32(4): 564-568.
DIAO Bo, WANG Jialin, CHENG Shunyou. The Confirmation of Decomposition Level in Wavelet Multi-resolution Analysis for Gravity Anomalies[J]. *Earth Science*, 2007, 32(4): 564-568.

[34] 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 青藏高原地壳的三维密度结构和物质运动[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 4223-4234.
YANG Wencai, HOU Zunze, YU Changqing. Three-Dimensional Density Structure of the Tibetan Plateau and Crustal Mass Movement[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(11): 4223-4234.

[35] 楼海, 王椿镛. 川滇地区重力异常的小波分解与解

释[J]. 地震学报, 2005, 27(5): 515-523.
LOU Hai, WANG Chunyong. Wavelet Analysis and Interpretation of Gravity Data in Sichuan-Yunnan Region, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2005, 27(5): 515-523.

[36] 袁道阳, 张培震, 雷中生, 等. 青海拉脊山断裂带新活动特征的初步研究[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 93-102.
YUAN Daoyang, ZHANG Peizhen, LEI Zhongsheng, et al. A Preliminary Study on the New Activity Features of the Lajishan Mountain Fault Zone in Qinghai Province[J]. *Earthquake Research in China*, 2005, 21(1): 93-102.

[37] HARRIS N. Channel Flow and the Himalayan - Tibetan Orogen: A Critical Review[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(3): 511-523.

[38] 刘威, 王绪本, 王向鹏, 等. 小波多尺度分析在青藏高原东缘重力场的应用[J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(1): 77-87.
LIU Wei, WANG Xuben, WANG Xiangpeng, et al. Application of Wavelet Multi-scale Analysis in the Gravity Field on the Eastern Edge of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 44(1): 77-87.

[39] TIAN X B, LIU Z, SI S K, et al. The Crustal Thickness of NE Tibet and Its Implication for Crustal Shortening[J]. *Tectonophysics*, 2014, 634: 198-207.

[40] SHI L, LI Y H, WANG W L, et al. Crustal Structure Beneath the Northeastern Margin of the Tibetan Plateau Constrained by Receiver Functions and Gravity Data[J]. *Tectonophysics*, 2022, 841: 229584.

[41] 杨文采, 施志群, 侯遵泽, 等. 离散小波变换与重力异常多重分解[J]. 地球物理学报, 2001, 44(4): 534-541.
YANG Wencai, SHI Zhiqun, HOU Zunze, et al. Discrete Wavelet Transform for Multiple Decomposition of Gravity Anomalies[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(4): 534-541.

[42] SCHOLZ C H. The Mechanics of Earthquakes and Faulting[D]. UK: University of Cambridge, 1990.

[43] 张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(10): 1607-1620.
ZHANG Peizhen, DENG Qidong, ZHANG Zhuqi, et al. Active Faults, Earthquake Disasters and Their Dynamic Processes in Chinese Mainland[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2013, 43(10): 1607-1620.

[44] ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, KING R W, et al. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet[J]. *Science*, 1997, 276(5313): 788-790.

[45] CLARK M K, ROYDEN L H. Topographic Ooze: Building the Eastern Margin of Tibet by Lower Crustal Flow[J]. *Geology*, 2000, 28(8): 703.

[46] 金胜, 魏文博, 汪硕, 等. 青藏高原地壳高导层的成因及动力学意义探讨: 大地电磁探测提供的证据[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2376-2385.
JIN Sheng, WEI Wenbo, WANG Shuo, et al. Discussion of the Formation and Dynamic Signification of the High Conductive Layer in Tibetan Crust[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(10): 2376-2385.