引文格式:吴云龙,李好,张帆,等.西藏定日县Ms 6.8地震深部构造特征与孕震环境分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2163-2175.DOI:10.13203/j.whugis20250052

Citation: WU Yunlong, LI Hao, ZHANG Fan, et al. Analysis of Deep Tectonic Characteristics and Seismogenic Environment of the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang, China[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(11):2163-2175.DOI:10.13203/j.whugis20250052

西藏定日县Ms 6.8地震深部构造特征与孕震环境分析

吴云龙[1] 李 好[1] 张 帆[1] 庞琪沛[1] 张 毅[1] 鄢建国[2] 储日升[3]

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430074
2 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079
3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,湖北 武汉,430077

摘 要:2025-01-07,在西藏日喀则定日县发生了Ms 6.8地震,此次地震震级高、烈度大,是该地区近年来发生的最大规模地震事件。地震的发生是地球内部能量释放的复杂过程,其成因主要与板块运动、地质构造活动以及深部构造特征和动力学环境等因素密切相关。为进一步探究定日县及周边地区地震活动性规律、提高区域地震风险防控能力,亟需在研究区域开展动力学过程和孕震环境的研究。基于XGM2019e全球重力场模型,采用重力均衡分析、小波多尺度分析和三维地壳密度结构反演等方法,分析了发震区域地壳密度结构和动力学过程。研究显示,震源区及周边地区布格重力异常呈现显著的负异常状态,其异常值介于-653~-101 mGal之间。研究区域南北走向断裂处于不均衡状态,地壳活动性较为强烈。地壳内部出现大量的南北向高密度异常区域,佐证了在印度-欧亚板块持续挤压的背景下,块体内部发生大规模的东西向伸展变形。因此,青藏高原南部地区地震多发态势主要受控于板块挤压诱发的深部物质运移与地壳内部东西向伸展变形,这种多尺度动力学过程共同构成了该区域的孕震环境。

关键词:定日县Ms 6.8地震;重力均衡;地壳密度结构;深部构造特征;孕震环境

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-03-08

DOI:10.13203/j.whugis20250052 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2163-13

Analysis of Deep Tectonic Characteristics and Seismogenic Environment of the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang, China

WU Yunlong[1] *LI Hao*[1] *ZHANG Fan*[1] *PANG Qipei*[1] *ZHANG Yi*[1]
YAN Jianguo[2] *CHU Risheng*[3]

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China
2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China
3 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: **Objectives:** This study aims to investigate the deep tectonic characteristics and seismogenic environment of the 2025 Dingri Ms 6.8 earthquake in Tibet. By analyzing crustal density structures and dynamic processes using gravity data, the research seeks to enhance understanding of seismic activity patterns in the region. Specifically, it focuses on deciphering how Indian-Eurasian plate interactions, combined with intraplate deformation, contribute to the formation of seismogenic zones. The findings aim to provide critical insights for improving regional earthquake hazard assessment and mitigation strategies in the seismically active southern Tibetan Plateau. **Methods:** The research utilizes the XGM2019e global gravity field model and shuttle radar topography mission 3 digital elevation data to compute Bouguer gravity anomalies. Gravity isostatic equilibrium analysis, based on the Airy model, is applied to evaluate crustal balance and derive

基金项目:国家自然科学基金(42325401, 42488301, 42274111, 42442015)。

第一作者:吴云龙,教授,研究方向为重力反演及地球深部构造。wuyunlong@cug.edu.cn

通信作者:储日升,博士,研究员。chur@apm.ac.cn

Moho depths. Wavelet multi-scale decomposition is employed to separate gravitational signals at different depths, enabling identification of shallow and deep-seated density anomalies. A three-dimensional crustal density inversion, constrained by CRUST1.0 model data, is performed to resolve fine-scale density variations. These methods collectively allow for a comprehensive analysis of crustal structure, fault activity, and material migration processes. **Results**: Key results reveal pronounced negative Bouguer gravity anomalies (−653 to −101 mGal) in the epicentral region, indicative of thickened crust and significant crustal heterogeneity. Wavelet analysis identifies active north-south trending faults, such as the Dengmecuo Fault, as zones of high gravitational gradient, coinciding with aftershock clusters. Gravity isostatic equilibrium calculations show disequilibrium along north-south faults, with large negative residual forces (−20 to −10 MPa), suggesting ongoing crustal sinking and mantle-crust interactions. Three-dimensional density inversion highlights north-south oriented high-density anomalies in the upper crust, corroborating east-west extensional deformation driven by plate convergence. The seismogenic zone at 10 km depth exhibits mixed high/low density structures, aligning with fault zones and stress accumulation areas. **Conclusions**: The study concludes that the Dingri earthquake was triggered by complex interactions between Indian-Eurasian plate collision and intraplate east-west extension. The persistent northward extrusion of the Indian Plate induces deep material migration, creating structural weaknesses along north-south faults. These faults, in a state of disequilibrium, facilitate stress accumulation and sudden release, leading to seismic events. The identified high-density anomalies in the crust reflect tectonic stretching and gravitational instability, further enhancing seismic potential. These findings underscore the importance of integrating multi-scale gravity analysis with structural geology to unravel seismogenic mechanisms in collision zones. The results provide a scientific basis for refining earthquake hazard models and developing targeted mitigation strategies in southern Tibet.

Key words: the Dingri Ms 6.8 earthquake; gravity anomaly; crustal density structure; deep structural characteristics; seismogenic environment

据中国地震台网测定,北京时间2025-01-07 9时5分,西藏自治区日喀则市定日县措果乡(28.5°N,87.45°E)发生Ms 6.8地震,震源深度10 km。地震波及定日、拉孜、萨迦、萨嘎和定结5个县、26个乡镇、206个村,形成以措果乡为中心的极震区。据应急管理部门统计,本次地震已造成126人遇难,受灾群众达6.15万人。截至1月21日9时5分,共记录到3级以上余震63次,最大余震为5级。此次地震震级高、烈度大,是该地区近年来发生的最强规模地震事件。

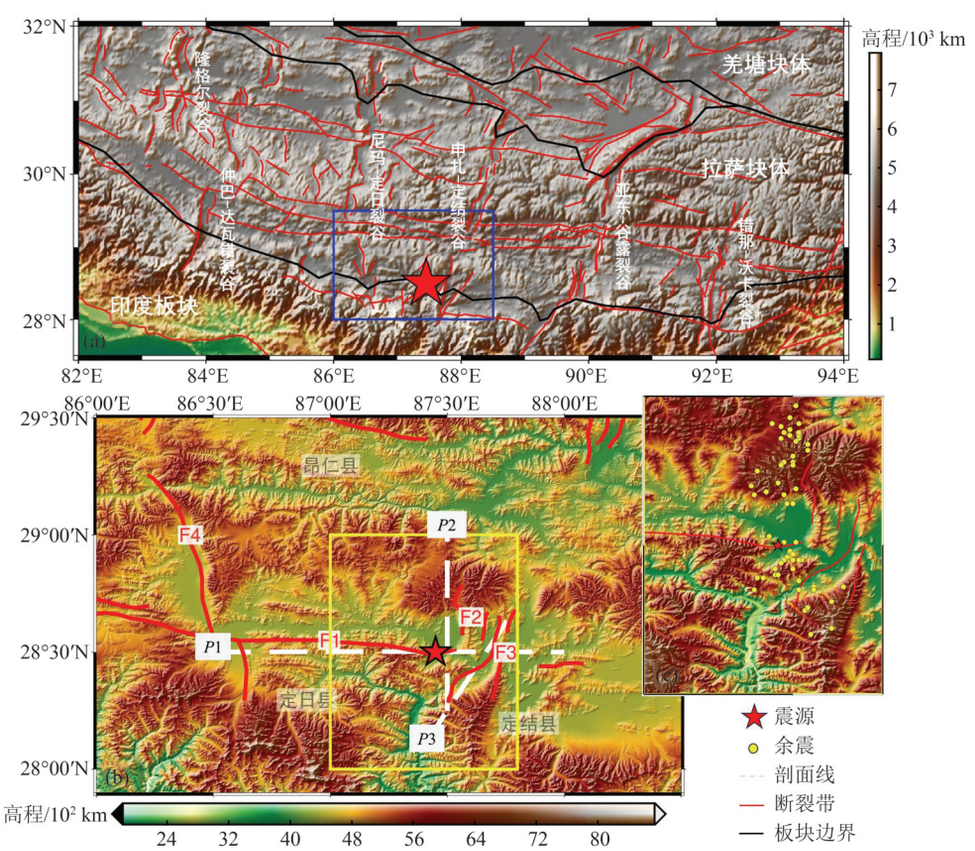
地震发生后,国内多个研究团队开展了快速响应。中国地震局地质研究所初步分析地壳形变及发震断裂模型,认为此次地震发震断层为登么错断裂北段,断层破裂至地表,潜在地表破裂长度约20 km;王楠等[1]基于卫星数据提取了此次地震的同震形变场,并通过反演获取了发震断层的几何参数和滑动分布情况;肖懿思等[2]结合全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)数据,采用PPP-B2b技术开展地表形变监测工作,同时进行震级反演研究;白玲等[3]基于近台观测地震波形数据和现场野外考察资料,分析了地震发生的构造背景与孕震过程;铁永波等[4]结合震源地区地质资料以及应急调查获取的现场资料,综合分析了此次地震地质灾害发育特征与分布规律,并提出了防灾减灾对策;谭莎莎等[5]采用合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)形变分析,判定此次地震发震断裂为近南北走向的登么错断裂,以正断层破裂为主,地表形变主要集中在断裂以西的上盘区域,变形特征以下沉为主,最大形变量级达2.1 m,断裂以东下盘区域以相对抬升为主,最大形变量级约0.7 m。以上研究为震源地区灾害潜在风险评估和防震减灾工作提供了重要参考依据,探究该地区深部构造特征和孕震环境是接下来亟待开展的研究工作。

青藏高原南缘处在全球最活跃的地震带之一的地中海-喜马拉雅地震带上,其强震活动受印度板块俯冲挤压、地质构造运动以及深部构造特征和动力学环境的共同控制。基于上述背景,在震源区开展地壳密度结构反演和动力学过程研究,旨在揭示青藏高原南部地区孕震环境的科学本质。研究将为定日县地震活动分析及未来地震灾害风险评估提供科学参考,对青藏高原南部地区防灾减灾工作具有重要意义。目前,在地球

深部结构的研究领域,一个常用的方法是解析地壳密度结构特征,以此来深入分析地下物质的运移特征[6-7]。重力场作为揭示岩石圈结构的重要地球物理参数,能够有效地反映地壳密度结构异常及深部物质迁移特征[8]。本文基于XGM2019e全球重力场模型和航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission,SRTM)的3弧秒数据(SRTM3)数字高程模型(digital elevation model,DEM),对震源及周边地区进行了重力异常分析、重力均衡计算,并构建了三维地壳密度结构模型,为进一步探究该地区深部孕震环境提供重要的科学参考。

1　震源及周边地区构造背景

青藏高原及周边地区受到印度板块向北的持续推挤和碰撞,发育了一系列大型逆冲断裂,产生了明显的地表构造隆起和深部构造特征变化[9-10]。西藏定日县Ms 6.8地震震中位于青藏高原中南部的拉萨地块(见图1),晚新生代以来,在南北向挤压和青藏高原整体隆升的构造背景下,高原内部东西向伸展变形显著,在高原中南部内发育了一系列呈南北走向的大型伸展构造,这些张性断裂错动了青藏高原南缘近东西走向的藏南滑脱拆离带[11]。此次地震地处青藏高原中南部地区近东西向的伸展变形区,该区域在高原东西向拉张作用下发育了一系列南北走向的裂谷系(图1),自西向东依次为隆格尔裂谷、仲巴-达瓦错裂谷、尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷、亚东-谷露裂谷、错那-沃卡裂谷,这些裂谷系由近南北向的正断裂及其限定的断陷盆地和谷地构成[12-14]。



(a)青藏高原南缘的地质构造图;(b)本文的研究区域;(c)余震的具体位置

图1　定日县地震区域构造图

Fig. 1　Tectonic Map of the Dingri Earthquake

图1为定日县地震区域构造图,其DEM数据来源于SRTM15+V2.6全球地形模型,由通用制图工具软件远程调用获取。图1(a)为青藏高原南缘的地质构造图,其中蓝色框所圈定的区域为本文的研究区域(图1(b)),黄色框所圈定的区域对应余震的具体位置(图1(c))。研究区域位于印度板块与亚欧板块碰撞前缘地带,区域内发育近南北向和近东西向两组断裂带,其中F1对应藏南滑脱拆离断裂带,F2对应登么错断裂带,F3对应申扎-定结断裂带,F4对应岗嘎-当惹雍错断裂带,并形成尼玛-定日裂谷和申扎-定结裂谷两条大型裂谷构造。余震分布特征显示,登么错断裂

带西侧的地震事件沿南北向展布特征显著,与区域构造走向具有良好对应性。从区域构造和震中位置可看到,定日县Ms 6.8地震震中位于青藏高原南部地区申扎-定结裂谷南缘的登么错断裂(图1)。申扎-定结裂谷先后发生过5次4.5级以上地震,发震断层均为近南北走向的正断层[15]。登么错断裂为北东-近南北向断裂,全长约60 km,自2015年尼泊尔地震之后,该断裂活动性明显增强[16]。根据登么错断裂的历史强震记录及震间断裂运动情况分析,该断裂具备发生中强地震的构造条件[17]。

2 数据与方法

布格重力异常包含了壳内各种偏离正常密度分布的矿体与构造等地质体的影响,也包括了地壳下界面起伏而在横向上相对上地幔质量的巨大亏损或盈余的影响,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[18]。本文的数据来源于XGM2019e全球重力场模型与SRTM3 DEM。XGM2019e是国际大地测量领域广泛使用的高分辨率全球重力场模型,由卫星重力数据(如重力场与稳态洋流探测器、重力恢复和气候实验)、地面观测数据、航空重力数据以及海洋测高数据联合反演得到,其空间分辨率能够达到2′[19]。SRTM3所提供的DEM数据的空间分辨率为3″(约90 m),覆盖非洲、北美、南美、欧亚、澳大利亚以及部分岛屿的陆地范围[20]。基于XGM2019e模型和SRTM3高程数据,采用方域法计算地形校正,并计算布格板校正。通过布格重力异常Δg_B的计算公式[9]:

$$\Delta g_B = \Delta g_{FA} + \Delta g_T - \Delta g_\sigma \tag{1}$$

可以计算得到研究区域的布格重力异常。式(1)中,Δg_{FA}为XGM2019e模型完全到2 190阶的自由空气重力异常;Δg_T为地形校正;Δg_σ为布格板校正。

重力场作为岩石圈多种场源信息相互叠加形成的复合场,致使原始重力场蕴含的信息极为繁杂,不同信息彼此交织,难以直接有效分辨。为契合地质构造解译的实际需求,必须对重力异常数据实施差异化处理。在本文的研究过程中,所采用的重力异常数据处理手段涵盖重力均衡分析方法、小波多尺度分析方法和地壳密度反演方法等。下面将对这些方法的基本原理予以简要阐述。

2.1 重力均衡分析方法

根据Airy均衡理论,在均一地壳模型下(即区域下方地壳密度均匀,且为2.670 g/cm^3),地表布格重力异常通常被认为是由地下深度为H处存在的较大范围、且厚度为Δh、密度为$\Delta\rho$的密度层所引起,其表达式为[21]:

$$\Delta g = 2\pi G\Delta\rho\int_H^{H+\Delta h} \mathrm{d}z = 2\pi G\Delta h\Delta\rho \tag{2}$$

式中,G为万有引力常数,根据现有的三维重力反演结果[22],本文设定研究区域上地幔密度为3.300 g/cm^3;$\Delta\rho$为0.630 g/cm^3。

根据郭凌冬等[23]的研究成果,拉萨站所在地区地壳内部活动较为稳定,因此,本文将其设为参考站,其布格重力异常Δg_0和莫霍面深度M_0分别为−471.367 mGal和67 km。根据FU等[24]提出的公式,可以推导出其余测站的莫霍面深度为:

$$M_i = M_0 + \frac{\Delta g_i - \Delta g_0}{2\pi G\Delta\rho} \tag{3}$$

式中,M_i是各测站的莫霍面深度;Δg_i是各测站的布格重力异常。

基于Airy均衡理论,当地壳处于均衡状态,可以根据各测站的地表高程h计算出对应的均衡面深度H_{iso},具体表达式为:

$$H_{\mathrm{iso}} = h + r + H_0 = h\left(1 + \frac{\rho_t}{\Delta\rho}\right) + H_0 \tag{4}$$

式中,ρ_t是地壳平均密度;r是均衡模型山根的厚度;通过整理前人的研究成果[22],本文中平均地壳厚度H_0设置为50 km。

已知均衡面深度H_{iso}和莫霍面深度M后,可以进一步计算研究区域的均衡附加力[25]来定量表示研究区域深部的均衡状态,具体表达式为:

$$P = (M - H_{\mathrm{iso}})\Delta\rho g \tag{5}$$

式中,g为重力加速度;$M - H_{\mathrm{iso}}$表示均衡异常值。

2.2 小波多尺度分析方法

地下复杂岩层组合因密度不均形成不同介质体,这种差异使得布格重力异常中能够识别出不同埋深、不同尺度的重力场源信息[26]。在利用布格重力异常进行研究区域深部构造特征分析时,需结合不同地质体产生的重力场响应特征提取多尺度局部异常信息。本文针对研究区域重力场特征,采用小波多尺度分析方法对重力异常数据进行多尺度分解[27-28],通过构建多尺度细节分量,一方面结合径向对数功率谱技术,实现对

不同深度层次重力异常特征的解析,另一方面为后续重力场反演提供多尺度数据支撑。

基于小波多尺度分解理论框架,对重力异常$g(x,y)$实施n层多尺度分解可得到[29]:

$$g(x,y)=A_n f(x,y)+\sum_{i=1}^{n}D_i f(x,y) \quad (6)$$

式中,n表示分解的阶次;$A_n f(x,y)$表示重力异常的n阶逼近;$D_i f(x,y)$表示i阶细节。在此基础上,进一步对经傅里叶变换后的重力异常细节场频谱进行对数功率谱分析,通过构建径向平均对数曲线提取各细节场对应的场源深度信息[30]。极坐标系下径向功率谱$\ln E(k)$及对应的场源深度表达式为:

$$\ln E(k)=\ln A^2-2hk \quad (7)$$

式中,A为尺度系数;h为等效源深度;k为波数。利用最小二乘法对径向对数功率谱曲线进行线性拟合,通过拟合直线斜率确定等效源深度。具体计算时,选取直线上两个特征点,其横坐标分别记为x_1、x_2,则对应的等效源深度h的计算公式为:

$$h=\frac{\ln(x_1)-\ln(x_2)}{2(x_1-x_2)} \quad (8)$$

2.3　地壳密度反演方法

研究区域东西向长度为430 km,南北向长度为490 km,深度为20 km;其几何大小为430×490×20 km^3,按模型网格大小10×10×2 km^{3}将研究区域地下划分为43×49×10个密度恒定的立方体单元,并以CRUST1.0全球地壳模型作为浅层密度约束,以获取此次定日县地震震源区及周边地区深部三维地壳密度结构。本文依托LI和OLDENBURG发展的重力场反演方法,通过引入拉格朗日乘子作为正则化约束条件,实现对目标区域三维地壳密度结构的精细化反演[31-32]。重力反演过程可视为如下的约束反演:

$$\min:\phi(m)=\phi_d+\mu\phi_m \quad (9)$$

式中,$\phi(m)$是反演总目标函数;ϕ_d代表数据拟合失配度;μ是正则化参数调节因子;ϕ_m为模型结构约束项。通过引入松弛变量z_i,将约束式(9)转化为:

$$s_i(m,z)=s_i(m)+z_i^2=0 \quad (10)$$

式中,$s_i(m,z)$是松弛变量函数;$s_i(m)$需满足:

$$s_i(m)=\begin{cases}m_1-m, m\geqslant m_1\\ 0, m=m_0\\ m-m_2, m\leqslant m_2\end{cases} \quad (11)$$

式中,m_0、m_1和m_2依次对应物理属性约束的等值条件、下界阈值和上界阈值。针对该约束优化问题,研究采用拉格朗日乘子λ_i与惩罚函数M构建约束体系,可以得到:

$$\min:F(m,z)=\phi(m)+\sum_{i=1}^{N_z}\lambda_i\left[s_i(m)+z_i^2\right]+\frac{M}{2}\sum_{i=1}^{N_z}\left[s_i(m)+z_i^2\right]^2 \quad (12)$$

式中,$F(m,z)$为最终确定的反演目标函数;N_z为松弛变量的数量。在执行反演计算时,将持续开展迭代求解,每一轮迭代均要求解出对应的松弛变量及密度值。整个过程不断推进,直至符合收敛条件,方可获得最优反演结果。

3　结果与分析

3.1　研究区域重力异常分布特征

图2(a)是研究区域的自由空气重力异常分布图,可以看出,该地区自由空气重力异常变化范围在−140～643 mGal之间,整体呈现南高北低的趋势,异常变化情况与地形地貌存在一定相关性,在地形起伏较大的地区,变化特征较为明显。由于研究区域海拔高、地形复杂,巨大的地形落差使得自由空气重力异常变化基本在几百毫伽。研究区域南部正异常区对应构造隆起地区,北部较为明显的条状负异常区域对应藏南地区近南北走向的尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷和近东西走向的雅鲁藏布江缝合带。

图2(b)反映的是定日县地震震源及邻近地区布格重力异常分布情况,可以看出布格重力异常值变化范围在−653～−101 mGal之间,整体变化趋势与自由空气重力异常一致,表明研究区域重力异常主要受其深部物质分布影响。图2中沿藏南滑脱拆离系断裂带两侧布格重力异常存在明显变化,这表明两侧地壳结构有显著差异。布格重力异常变化特征也反映了莫霍面埋深自南向北逐渐变浅,北侧表现为明显的负异常分布区,表明该地区地壳相对较厚[33];南侧表现为高低异常交错出现,异常值存在明显差异,雅鲁藏布江缝合带及两条裂谷均表现为较低的布格重力异常分布。

3.2　研究区域小波多尺度分析结果

结合前人研究工作的计算策略[34-35],本文选用bior3.5小波基函数,基于小波多尺度分析技术框架,对布格重力异常场数据实施5层多尺度分解,得到了定日县Ms 6.8地震震源及邻近地区不同尺度下的布格重力异常小波细节图(图3)。在此基础上,基于径向对数功率谱分析技术,对多

尺度分解后的布格重力异常细节场进行频谱特征分析,提取各细节场对应的场源深度(表1)。

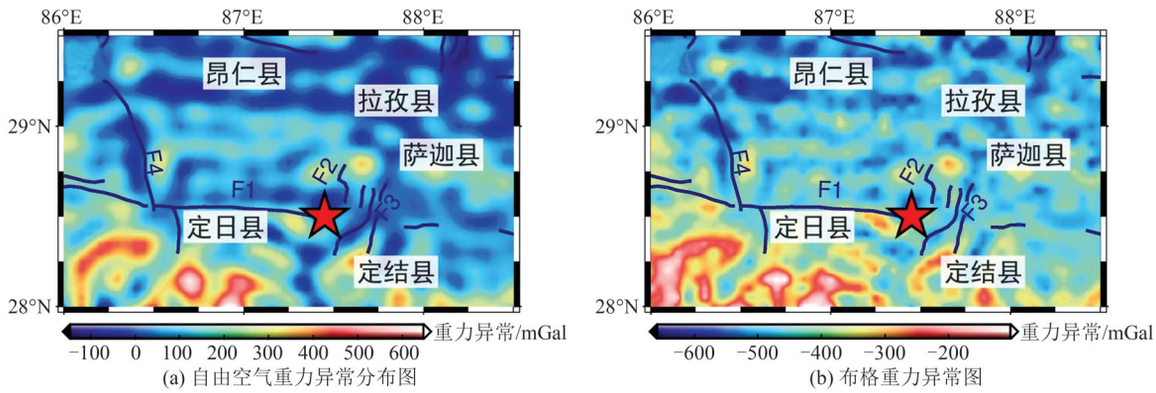


图2 研究区域重力异常分布图

Fig. 2 Distribution Map of Gravity Anomaly in the Study Area

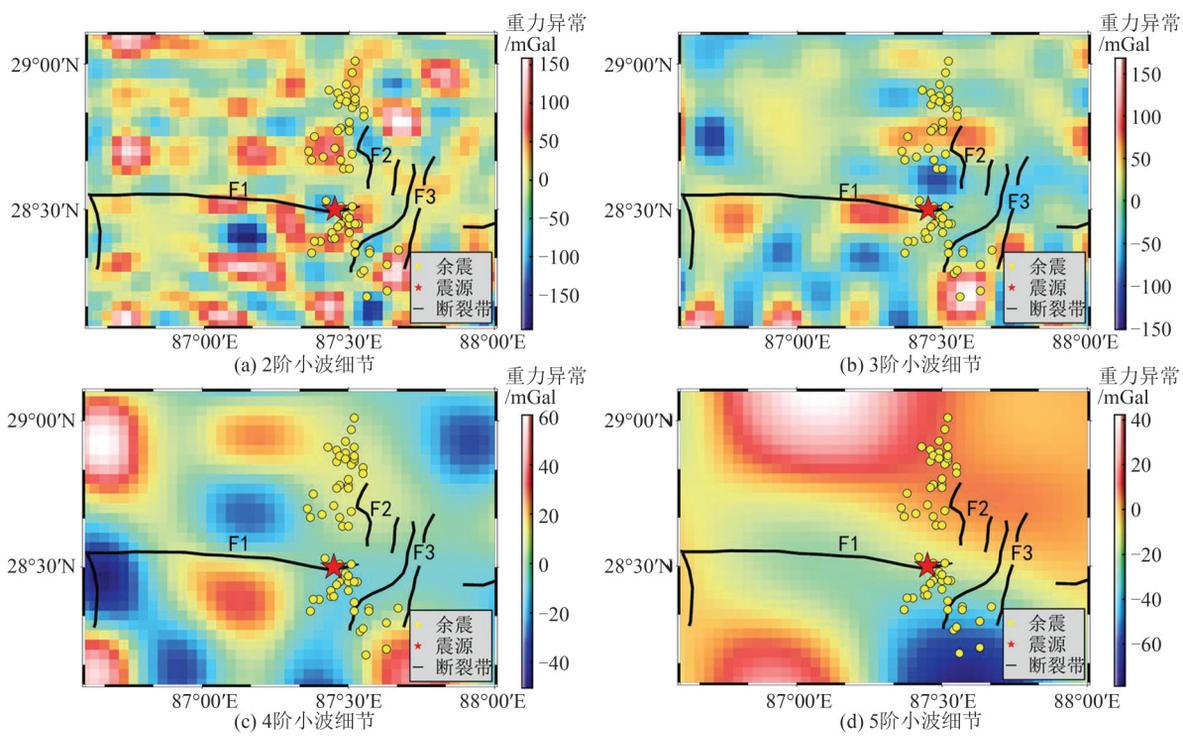


图3 研究区域的布格重力异常2~5阶小波细节图

Fig. 3 The 2nd to 5th Orders Wavelet Details of the Bouguer Gravity Anomaly in 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 Orders Details

阶次	近似场源深度/km	对应地层
1	3.6	沉积层
2	12.1	上地壳
3	24.3	中地壳
4	37.2	中地壳
5	62.3	下地壳

由于1阶细节场埋深较浅,高低异常变化剧烈且复杂,所包含信息较为杂乱,本文中没有进行深入分析。图3(a)为2阶小波细节场,可以看到,研究区域上地壳的布格重力异常的分布呈现出紊乱无序的格局,存在−160~150 mGal的异常波动区间,其中高值与低值交替出现的区域多呈现断续的串珠状分布特征。区域内主要断裂构造与正负异常过渡带表现出良好的空间耦合关系,尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷所在位置表现为正负异常交替的条带。图3(a)揭示了该区域沉积层与上地壳物质密度的不均一性。对应此次地震余震发生的位置可看出,余震发生位置也集中在登么错断裂两侧正负重力异常交替区域。

随着阶数的增加,布格重力异常细节场所对

应场源深度逐渐加深,重力异常分布也逐渐变得平滑。3 阶小波细节(图 3(b))与 4 阶小波细节(图 3(c))对应研究区域中、下地壳物质密度分布特征,异常主要呈现椭圆状分布。登么错断裂、申扎-定结断裂和藏南滑脱拆离系断裂两侧依然处在正负重力异常的梯度带上,反映了其下方深部区域存在活跃的壳幔物质运移。研究区域北侧区域重力异常变化相对较小,南侧重力异常变化更为剧烈。这表明拉萨块体内部相对稳定,而块体边缘受到印度板块的俯冲和碰撞影响,构造运动更为活跃[36]。

根据径向功率谱分析的结果,5 阶小波细节(图 3(d))场源深度对应研究区域的下地壳。从图 3(d)反映出在局部区域出现团状的正、负异常聚集的现象,研究区域南侧的印度板块呈现出明显的负异常,北缘拉萨块体则表现为正异常。这种现象可能源于印度板块在青藏高原南部边缘与欧亚板块发生强烈碰撞挤压时,岩石圈下部物质的变形及流动受到多种因素制约,随着板块持续的挤压碰撞,向下俯冲的岩体密度显著低于下伏岩体,由于该密度差所产生的阻碍作用,岩石圈底部物质无法沿俯冲带持续向下渗透,进而被迫沿构造薄弱区域向地表方向运移,使得拉萨地块北侧表现出明显的正异常分布[37]。

3.3　重力均衡分析结果

图 4 为重力均衡分析的计算结果,各子图中从上往下依次表示研究区域的布格重力异常、莫霍面和均衡面深度以及均衡附加力。从图 4 中可以看到,*P*1 剖面的均衡面深度在67.627～74.058 km 之间变化,莫霍面深度在 64.235～74.744 km 之间波动,在登么错断裂西侧存在较大变化,这与该处高程存在较大落差有关,可以看出均衡面深度与地形具有较大相关性;*P*2 剖面的均衡面深度在 67.630～74.084 km 之间波动,莫霍面深度变化范围在 63.575～70.089 km 之间,呈深-浅-深的变化趋势;*P*3 剖面的均衡面深度在 67.698～72.943 km 之间波动,莫霍面深度在 63.166～73.169 km 之间变化,总体趋势是自西南向东北逐渐变浅。

基于 Airy 均衡理论,在地壳密度均一的前提下,当莫霍面深度与均衡面深度相近或相等时,通常认为该地区处于均衡状态,这意味着地壳自重与其所受浮力相互平衡[21]。而当莫霍面与均衡面分离时,其间的剩余物质会产生附加浮力,需要岩石圈挠曲变形产生弹性力以维持平衡,该弹性力即为均衡附加力[24-25]。本文中 *P*1 剖面沿藏南滑脱拆离断裂自西向东设置,该剖面附加均衡力整体较小,在丁木错地堑和申扎-定结断裂附近区域,均衡附加力向下且数值较大,在－20～－10 MPa 变化;*P*2 剖面和 *P*3 剖面分别沿登么错断裂和申扎-定结断裂设置,剖面均为近南北走向,两条剖面整体上处于负均衡异常状态,多处均衡附加力超过－20 MPa,而在与藏南滑脱拆离断裂相交处,均衡附加力基本上为 0 MPa。结果表明,研究区域东西走向断裂处于均衡状态,深部构造运动相对稳定;而南北走向断裂处于非均衡状态,地壳下沉趋势强烈,壳幔物质的交换、运移也更为活跃。这可能也导致了研究区域内近年来在近南北走向的正断层多次发生 4 级以上地震。

3.4　研究区域地壳密度结构

在重力解释中,实测重力异常通常被视为区域重力异常与局部重力异常的组合。利用范围与幅度较小的局部重力异常反演地壳密度结构时,需从重力异常中分离出广泛分布且较深的地质因素,如莫霍面所引起的区域异常。基于小波多尺度分解理论,本文对震源及周边地区的布格重力异常开展多尺度分离处理,将小波细节的总和作为局部重力异常,将 5 阶小波逼近作为区域重力异常。

定日县 Ms 6.8 地震震源及邻区局部重力异常分布如图 5(a)所示,研究区域北侧地区重力异常变化较为平缓,存在较为明显的东西走向条状正异常分布;南部地区重力异常变化剧烈,正负异常差值较大,反映了块体边缘受印度板块俯冲碰撞影响构造活动较为剧烈。图 5(b)为震区的区域布格重力异常,场源深度对应 62.3 km,得到的莫霍面平均深度与前人成果近乎一致,且重力异常分布特征与莫霍面形态趋势高度契合[38],揭示了莫霍面的起伏特征。图 5 中重力异常自南向北逐渐减小,以藏南滑脱拆离断裂为界,两侧异常值变化剧烈,反映了莫霍面埋深自南向北逐渐变浅。

此次西藏定日县 Ms 6.8 地震震源深度为 10 km,为进一步探究震源及邻近区域深部构造特征与孕震环境,本文将重力反演深度设定为 20 km。反演所需浅层约束信息及物性约束密度差可以通过先验信息设定,以 CRUST1.0 模型提供的沉积层深度和密度值作为浅层约束信息[39],密度差设定为 0.54 g/cm^3,采用拉格朗日乘子法,将上述浅层约束信息引入反演过程中,在不断迭代的过程中使密度反演结果更加符合实际情况。本文采用以下参数设置方案实施反演计算:初始正则

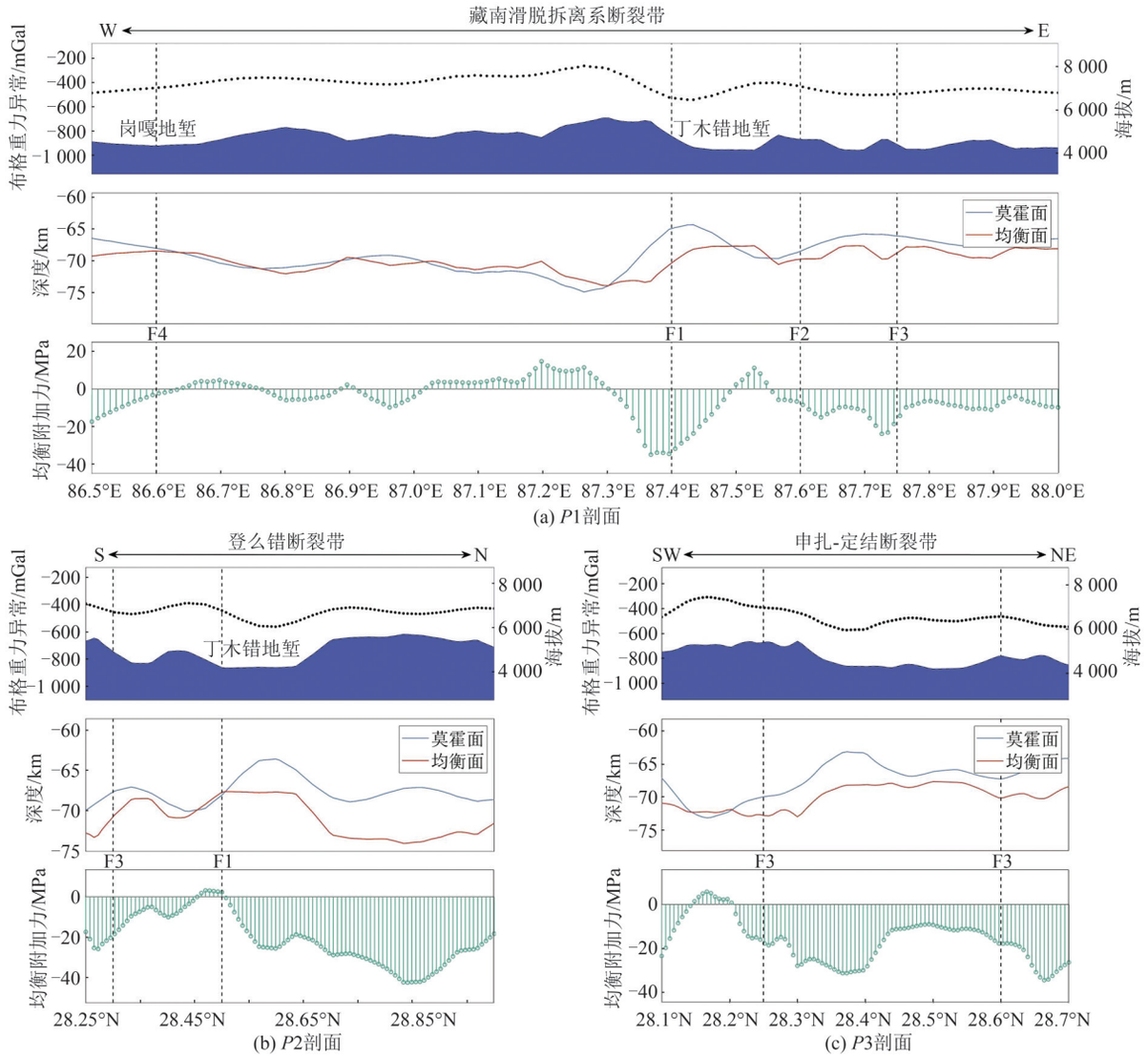


图4 研究区域剖面重力均衡分析结果图

Fig. 4 Gravity Isostatic Analysis Results of the Profiles in the Study Area

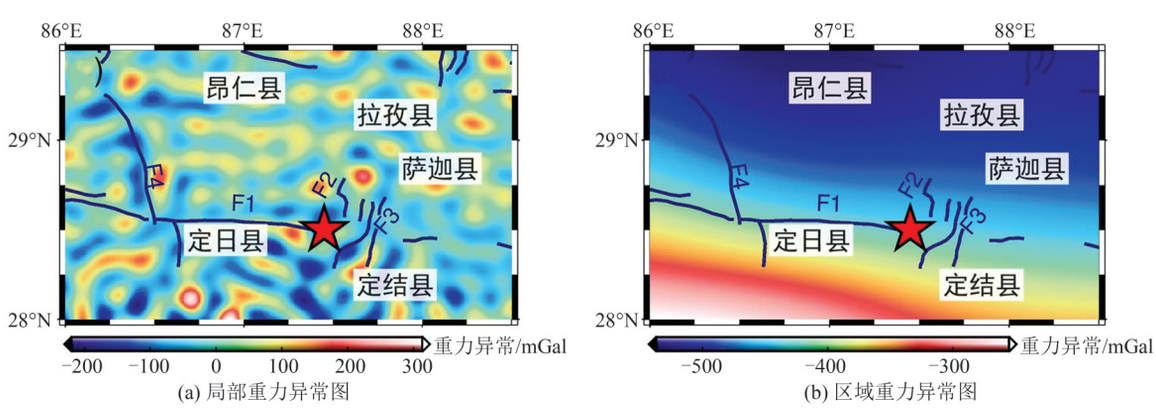


图5 研究区域局部重力异常与区域重力异常

Fig. 5 Local Gravity Anomaly and Regional Gravity Anomaly in the Study Area

化惩罚因子赋值为1×10^{-6}量级，深度加权函数系数取值3，迭代终止条件设定为残差收敛至1×10^{-8}以下。通过开展多组正则化参数对比实验，构建Tikhonov正则化参数响应曲线（图6），采用拐点判别法确定最佳正则化参数$\mu=500$，确保反演过程达到最优稳定性条件[32]。对最终获得的三维地壳密度模型实施多深度层位切片分析，得到不同深度界面的密度分布特征（图7）。图7(a)

~7(h)分别表示研究区域地下 3、5、7、9、11、13、15 和 17 km 的地壳密度分布情况。

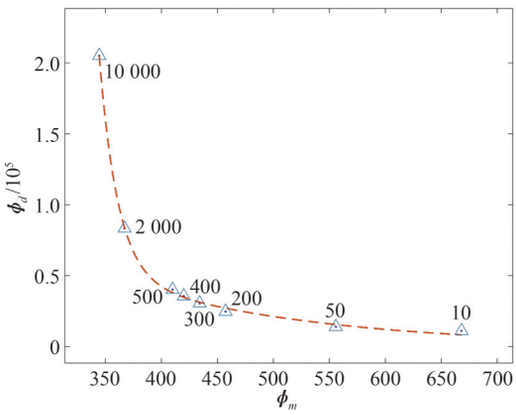


图 6　Tikhonov 正则化参数响应曲线图

Fig. 6　Tikhonov Regularization Parameter Selection Curve

可以看到,地下 3 km 深度处(图 7(a)),以藏南滑脱拆离系断裂为界,研究区域北部密度变化较为平缓,南部则表现为高密度区域、低密度区域交织的特点,这反映了拉萨块体内部相对稳定,而块体边缘受到印度板块的俯冲和碰撞,构造运动更为活跃。图中近南北走向的登么错断裂与申扎-定结断裂所在区域,存在高密度异常聚集,两侧密度变化较为明显,这表明这些断裂带所在位置活动性相对较强,近年来研究区域内所发生的地震事件大都在近南北走向的断裂带地区。

在地下 5 km(图 7(b))、地下 7 km(图 7(c))深度处,地壳密度分布呈现出较为明显的分区现象。近南北走向的尼玛-定日裂谷、申扎-定结裂谷两侧出现条状异常区域,对应研究区域内的高山与盆地构造。研究区域西北部密度场呈现均质性特征,表明地壳块体结构具有较高稳定性;而东部、东南部密度场呈现出显著的条带状分布,高密度条带与低密度条带界限分明,总体表现为南北向的高密度异常,这可能是由于喜马拉雅山南北两侧构造变形由近南北向挤压转变为近东西向伸展,增厚抬升的地壳受力撕裂与塌陷,从而在图中表现为高密度区域。

定日县 Ms 6.8 地震震源埋深约 10 km,该深度地壳密度结构混杂。地壳密度结构反演结果(图 7(d)、7(e))显示,震源区位于地下 9~11 km 深度范围内高密度物质与低密度物质相互混杂的区域。结合 2 阶小波细节场(图 3(a)),该区域深部物质分布复杂,构造活动较为强烈。从成像结果来看,近南北走向的登么错断裂和申扎-定结断裂均位于高、低密度交替的区域,这与均衡分析的结果相印证。此外,研究区域内存在大量南北向高密度异常区域,这也证明了晚新生代以来,在青藏高原南北向挤压与整体隆升的构造背景下,高原内部东西向伸展变形[40-41],地壳受力撕裂。高密度物质在印度板块的逐渐压迫下沿薄弱区域上涌,使得研究区域上中地壳出现近南北走向的条状高密度异常区域。

地下 13 km(图 7(f))、15 km(图 7(g))和 17 km(图 7(h)))深度的地壳密度反演结果差异相对较小。结果表明,相较于浅层地壳密度结构,南北走向的条状高密度异常区域随深度加深变得更加明显。以藏南滑脱拆离系断裂为界,研究区域西南侧密度值相对较低,在喜马拉雅山所在位置表现为高密度异常聚集;区域北侧密度值相对更高,这可能是由于印度-欧亚板块的持续挤压,高原地壳增厚抬升,深部物质在高原南部向北东方向运移。

4　讨　论

4.1　研究区域动力学过程

由于印度板块的长期挤压作用以及周边大型断裂带的限制,青藏高原南部地区显著抬升,导致高原周边的盆地呈现出向周围山系俯冲的“冠状结构”[42-43]。结合多尺度重力异常细节分量与三维地壳密度模型(图 3、图 7),研究区域南部地壳呈现显著正重力异常特征,对应较高的密度值,推测这与印度-亚欧板块的持续碰撞引发的高原隆升和地壳增厚作用密切相关。同时,由于周边刚性块体侧向约束的影响,深部高密度物质自南向北朝亚欧板块迁移,形成高密度物质的局部富集[44]。从研究区域的地壳密度结构中还能看到,拉萨块体与喜马拉雅块体存在多处近南北走向的条状高密度异常体,这可能源于板块挤压产生的巨大热能引发岩石熔融,同时板块碰撞导致块体发生东西向伸张,增厚抬升的地壳受力塌陷,高密度物质在板块挤压作用下沿南北走向的地壳薄弱区运移[45]。重力均衡分析的结果(图 4)也说明了研究区域东西走向断裂处于均衡状态,深部构造运动相对稳定;而南北走向断裂处于不均衡状态,地壳活动性较为强烈,深部物质、能量的交换、运移与调整也更为剧烈。

4.2　研究区域深部孕震环境

地震活动是区域构造应力在断裂带持续积累并最终突破临界状态的结果[46]。研究区域位于青藏高原南缘,位于拉萨块体与印度板块交界位置(图 1)。重力异常分布显示(图 2),地震及伴随发生的余震多位于登么错断裂和藏南滑脱拆

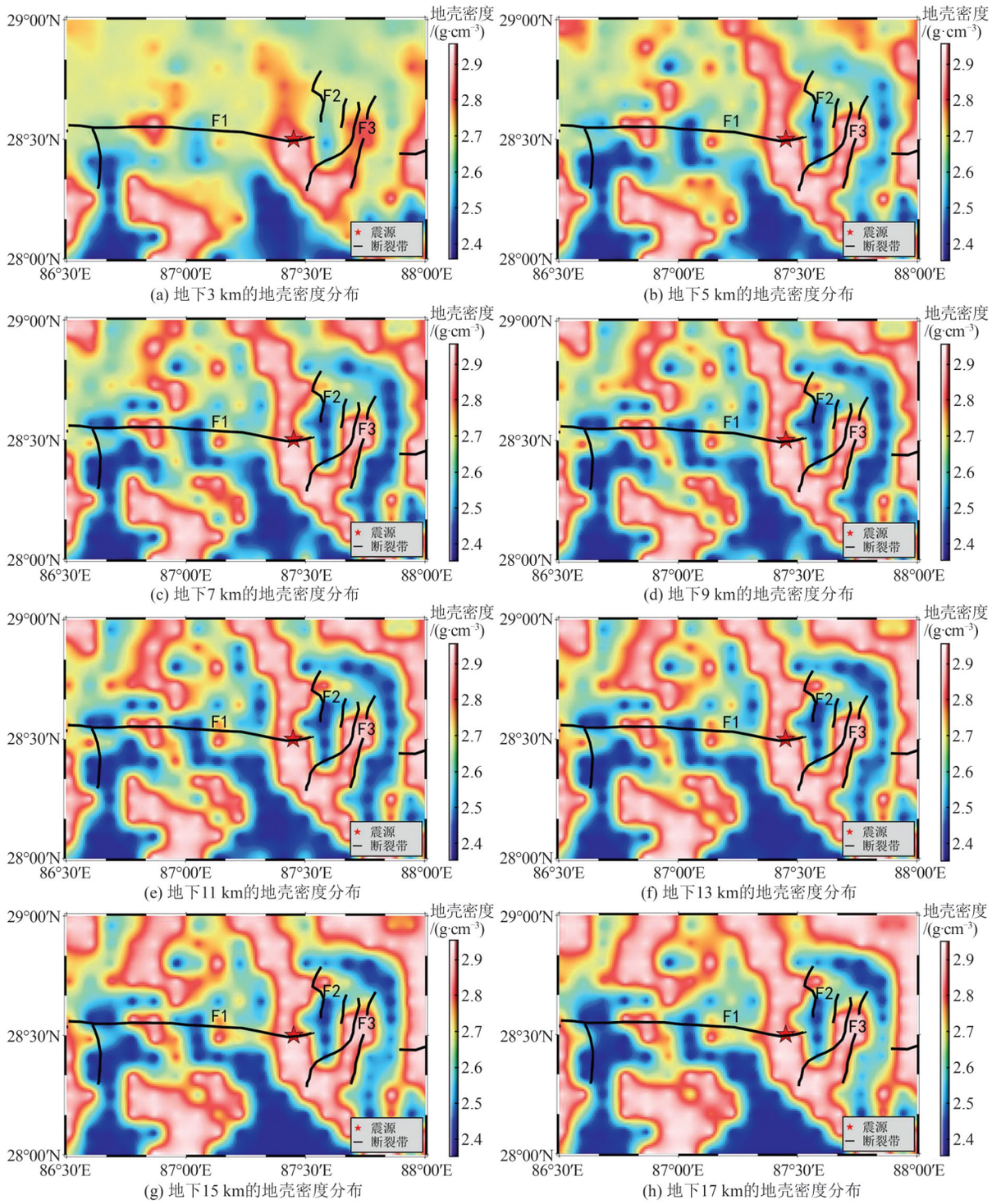


图7 研究区域三维地壳密度结构

Fig. 7 3D Crustal Density Structure in the Study Area

离系断裂东端上。震中位于喜马拉雅构造弧的顶点,是与邻区构造单元构造作用比较强烈的部位[47]。板块挤压作用下,深部物质沿南北走向的地壳薄弱区运移,导致深部物质重新分布,形成复杂的地壳密度结构(图7)。

定日县Ms 6.8地震及后续发生的余震主要位于申扎-定结裂谷系统内,属于青藏高原及周边地区上地壳正断层活动引发的中强震事件[48]。小波细节图(图3)揭示研究区域北侧地区重力异常变化相对较小,南侧重力异常变化更为剧烈,这表明拉萨块体内部相对稳定,而块体边缘受到印度板块的俯冲和碰撞,构造运动更为活跃。同时下地壳重力场表现出均质性特征,这种稳定的深部构造可能促使应力向中上地壳转移,为浅部

强震孕育提供了条件。重力均衡分析的结果表明(图 4),定日县地震发生在正负均衡异常变化的过渡区域,后续发生的余震主要集中在登么错断裂的西侧,呈南北纵向分布,并且均衡附加力较大,深层构造活动强烈。结合反演得到的地壳密度结构(图 7)显示出研究区域深部存在南北向高密度分布,印证了高原深部物质向浅层地壳上涌的特征和块体受到东西伸展作用影响。因此,块体内部大规模的东西向伸展使得地壳沿南北走向撕裂塌陷,以及深部物质在板块挤压下沿薄弱区运移,为该地区近南北走向的正断层多发地震提供了条件。

5　结　语

本文利用 XGM2019e 重力场模型,分析了均一地壳模型下研究区域内断裂带的重力均衡状态,并计算了其对应的均衡附加力;基于小波多尺度分解理论框架,对研究区域布格重力场进行了多空间波长层次的特征解析;运用基于拉格朗日乘子法约束的三维重力反演方法,对研究区域的地壳密度结构进行了计算,并从重力学的角度对西藏定日县 Ms 6.8 地震震中及周边区域进行了综合分析,探讨了其动力学过程与深部孕震环境。研究结果显示:

1)重力均衡方法得到的剖面地壳均衡状态结果表明,研究区域东西走向断裂处于均衡状态,深部构造运动相对稳定;而南北走向断裂处于不均衡状态,多处均衡附加力超过 −20 MPa,地壳活动性较为强烈,深部物质、能量的交换、运移与调整也更为剧烈。

2)研究区域地壳浅层布格重力异常高、低值交替出现,呈串珠状分布,反映了上地壳构造活动剧烈,发育了多条重力梯度带。中、下地壳多尺度重力异常细节场呈现出团状的正、负异常聚集特征,南侧表现为明显的负异常,而北侧拉萨块体表现为正异常,这反映了岩石圈下部物质在板块挤压下难以向下渗透而向地表流动。

3)定日县 Ms 6.8 地震震源区地壳密度反演结果表现为高低密度交替分布,反映了登么错断裂具有较强活动性。研究区域三维地壳密度结构表现出大量的南北向高密度异常区域,这佐证了在印度-欧亚板块持续挤压的背景下,藏南地区内部发生大规模的东西向伸展变形。

4)研究区域地震多发于重力异常梯度带、地壳密度过渡带。结合多尺度布格重力异常分布特征、地壳密度结构反演结果和重力均衡分析结果,研究区域深部大规模的东西向伸展使得地壳沿南北走向撕裂塌陷,以及深部物质在板块挤压下沿薄弱区运移,为该地区近南北走向的正断层多发地震提供了条件。

参　考　文　献

[1] 王楠, 李永生, 申文豪, 等. 2025年1月7日西藏定日 Ms 6.8 地震震源机制 InSAR 反演及强地面运动快速模拟[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 404-411.
WANG Nan, LI Yongsheng, SHEN Wenhao, et al. Source Parameters and Rapid Simulation of Strong Ground Motion of the Ms 6.8 Earthquake on January 7, 2025 in Dingri (Xizang, China) Derived from InSAR Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 404-411.

[2] 肖懿思, 方荣新, 李瑜, 等. 利用高频 GNSS 观测研究2025年西藏定日 Ms 6.8 地震地表形变及预警震级[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, DOI:10.13203/j.whugis20250049.
XIAO Yisi, FANG Rongxin, LI Yu, et al. Surface Displacement and Early Warning Magnitude of the 2025 Dingri, Xizang Ms 6.8 Earthquake Using High-Rate GNSS Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, DOI:10.13203/j.whugis20250049.

[3] 白玲, 陈治文, 王绍俊. 2025年西藏定日 6.8 级地震:构造背景分析与震源特征探讨[J]. 地球与行星物理论评(中英文), 2025, 56(3): 258-263.
BAI Ling, CHEN Zhiwen, WANG Shaojun. The 2025 Dingri Ms 6.8 Earthquake in Xizang: Analysis of Tectonic Background and Discussion of Source Characteristics[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 2025, 56(3): 258-263.

[4] 铁永波, 高云建, 张宪政, 等. 西藏定日县 Ms 6.8 级地震区地质灾害发育规律与减灾对策研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2025,40(1):212-224.
TIE Yongbo, GAO Yunjian, ZHANG Xianzheng, et al. Study on the Development Laws and Mitigation of Geological Hazards in Dingri Ms 6.8 Earthquake Region, Xizang Autonomous Region[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2025, 40(1):212-224.

[5] 谭莎莎, 杨莹辉, 许强, 等. 2025年1月7日西藏定日县 Ms 6.8 级强震地表同震形变特征与房屋建筑震损分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025,52(2):212-222.
TAN Shasha, YANG Yinghui, XU Qiang, et al.

Coseismic Deformation and Seismic Damage Assessment of Buildings from the Ms 6.8 Earthquake in Dingri, Xizang, on January 7, 2025[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*(*Science & Technology Edition*), 2025,52(2):212-222.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 曾华霖. 重力场与重力勘探[M]. 北京:地质出版社,2005.
ZENG Hualin. Gravity Field and Gravity Exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[9] KUSKY T M, MENG J N. Perspectives on the M 7.1 2025 Southern Tibetan Plateau (Xizang) Earthquake [J]. *Journal of Earth Science*, 2025,36(2): 843-846.

[10] 滕吉文,司芗,王谦身,等. 青藏高原地球科学研究中的核心问题与理念的厘定[J]. 地球物理学报,2015,58(1):103-124.
TENG Jiwen, SI Xiang, WANG Qianshen, et al. Collation and Stipulation of the Core Science Problems and Theoretical Concept in the Geoscience Study on the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(1): 103-124.

[11] 梁生贤,王绪本,徐铮伟,等. 重力异常揭示印度大陆地幔岩石圈在喜马拉雅东部之下陡俯冲[J]. 中国科学:地球科学,2023,53(9):2018-2034.
LIANG Shengxian, WANG Xuben, XU Zhengwei, et al. Steep Subduction of the Indian Continental Mantle Lithosphere Beneath the Eastern Himalaya Revealed by Gravity Anomalies[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2023, 53(9): 2018-2034.

[12] ARMIJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, et al. Quaternary Extension in Southern Tibet: Field Observations and Tectonic Implications [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B14): 13803-13872.

[13] ENGLAND P, HOUSEMAN G. Extension During Continental Convergence, with Application to the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1989, 94(B12): 17561-17579.

[14] AN Y, KAPP P A, MURPHY M A, et al. Significant Late Neogene East-West Extension in Northern Tibet[J]. *Geology*, 1999, 27(9): 787.

[15] 李楠,刘陇强,朱利东,等. 喜马拉雅北缘丁木错地堑第四纪软沉积物变形构造[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2024,51(6):1048-1056.
LI Nan, LIU Longqiang, ZHU Lidong, et al. Quaternary Soft-Sediment Deformation Structures in the Dingmucuo Graben, Northern Himalaya[J]. *Journal of Chengdu University of Technology* (*Science & Technology Edition*), 2024, 51(6): 1048-1056.

[16] ELLIOTT J R, WALTERS R J, ENGLAND P C, et al. Extension on the Tibetan Plateau: Recent Normal Faulting Measured by InSAR and Body Wave Seismology[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(2): 503-535.

[17] 田婷婷,吴中海. 西藏申扎-定结裂谷南段丁木错正断层的最新史前大地震事件及其地震地质意义[J]. 地质论评,2023,69(S1):53-55.
TIAN Tingting, WU Zhonghai. The Latest Prehistoric Earthquake Event of Dingmucuo Normal Fault in the Southern Section of Shenzha-Dingjie Rift in Tibet and Its Seismic Geological Significance[J]. *Geological Review*, 2023, 69(S1): 53-55.

[18] 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.
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.

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

[20] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2).

[21] 庞琪沛,吴云龙,张毅,等. 淮北及邻区地壳均衡异常与构造背景[J]. 地球物理学报,2024,67(9):3341-3356.
PANG Qipei, WU Yunlong, ZHANG Yi, et al. Isostasic Anomaly and Tectonic Background in Huaibei City, Anhui and Its Adjacent Areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2024, 67(9): 3341-3356.

[22] 冯锐. 中国地壳厚度及上地幔密度分布(三维重力反演结果)[J]. 地震学报,1985,7(2):143-157.
FENG Rui. Crustal Thickness and Densities in the

Upper Mantle Beneath China—The Results of Three Dimensional Gravity Inversion[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1985, 7(2): 143-157.

[23] 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. Study on Lithospheric Equilibrium of Sangri-Medog Section of Yarlung Zangbo River and Analysis of Earthquake Risk Induced by Virtual Reservoir[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9): 3220-3231.

[24] FU G Y, GAO S H, FREYMUELLER J T, et al. Bouguer Gravity Anomaly and Isostasy at Western Sichuan Basin Revealed by New Gravity Surveys [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, 119(4): 3925-3938.

[25] FU G Y, SHE Y W. Gravity Anomalies and Isostasy Deduced from New Dense Gravimetry Around the Tsangpo Gorge, Tibet [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10233-10239.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 黎莎. 小波变换在重力异常提取中的研究及应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
LI Sha. Study and Application of Local Gravity Anomaly Extraction Based on Wavelet Transform[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[29] 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.

[30] SPECTOR A, GRANT F S. Statistical Models for Interpreting Aeromagnetic Data [J]. *Geophysics*, 1970, 35(2): 293-302.

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

[32] 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.

[33] 孙少波, 陈石, 龚立卓, 等. 青藏高原及周边地壳均衡模式与强震活动[J]. 地震学报, 2018, 40(3): 341-350.
SUN Shaobo, CHEN Shi, GONG Lizhuo, et al. Crustal Isostasy Model and Strong Earthquakes in the Tibetan Plateau and Its Surroundings[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2018, 40(3): 341-350.

[34] 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.

[35] 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.

[36] BILHAM R, GAUR V K, MOLNAR P. Himalayan Seismic Hazard [J]. *Science*, 2001, 293(5534): 1442-1444.

[37] 张涛. 青藏高原南部及其东南缘弧形构造带地应力场特征研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2020.
ZHANG Tao. Study on the Characteristics of In-Situ Stress Field in the Southern Tibetan Plateau and Its Arc Structural Belt in Southeastern Margin[D]. Wuhan: Changjiang River Scientiffic Research Institute, 2020.

[38] 梁晓峰, 陈凌, 田小波, 等. 青藏高原地壳结构特征指示的高原隆升机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(12): 2808-2829.
LIANG Xiaofeng, CHEN Ling, TIAN Xiaobo, et al. Uplifting Mechanism of The Tibetan Plateau Inferred from The Characteristics of Crustal Structures [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(12): 2808-2829.

[39] LASKE G, MASTERS G, MA Z, et al. CRUST1.0: An Updated Global Model of Earth's Crust [J]. *Geophysical Research Abstracts. EGU*, 2012, 14:743.

[40] 张进江, 丁林. 青藏高原东西向伸展及其地质意义[J]. 地质科学, 2003, 38(2): 179-189.

(下转第 2186 页)