

四川长宁及周缘重力数据融合及深浅构造特征研究

麻继文^{1,2)}, 吴桂桔^{1,2)*}, 邹正波^{1,2)}, 谈洪波¹⁾, 王嘉沛¹⁾

1) 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北武汉 430071;

2) 防灾科技学院, 河北廊坊 065201

摘要: 高精度地球物理数据是获取地壳内部物质变化的基础, 2019 年 6 月 17 日四川长宁发生 $M_s6.0$ 级地震, 近期该区域多次发生 5 级左右地震, 且区域内地震的发震诱因存在争议。本研究以实测重力剖面数据为基准, 首先寻找重力场模型数据与实测重力剖面数据之间的映射关系式; 然后对重力场模型数据进行修正, 采用双线性插值法获取研究区内高精度网格数据; 以长宁 $M_s6.0$ 地震震中为中心点, 提取 4 条重力剖面并采用密度反演获取跨长宁 $M_s6.0$ 地震震中的地壳密度差变化特征。研究结果表明: 通过重力场模型数据与实测重力数据间的映射关系式计算所获取的融合数据精度小于 5%; 长宁及周边震群发震区域对应三叠纪地层且震群多沿背斜、向斜发生; 长宁 $M_s6.0$ 地震位于剩余布格重力异常 0~30 mGal 的正低值区域和密度反演高低转换带上 0.048~0.058 g/cm³ 的正低值区域, 该区域位于长宁背斜上的大地湾断层与双河背斜轴部隐伏断层的交汇处。本研究可为多源重力数据融合提供技术基础, 服务于以动力学为基础的地震物理预测。

关键词: 重力数据融合; 布格重力异常; 长宁地震; 密度反演

中图分类号: P315; P631.1 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.011602

Gravity Data Fusion and Deep-shallow Structure Characteristics in Changning of Sichuan Province and Its Periphery

MA Jiwen^{1,2)}, WU Guiju^{1,2)*}, ZOU Zhengbo^{1,2)}, TAN Hongbo¹⁾, WANG Jiawei¹⁾

1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan, Hubei 430071;

2) Institute of Disaster Prevention, Langfang, Hebei 065201

Abstract: High-precision geophysical data is the basis for obtaining material changes inside the crust. On June 17, 2019, a $M_s6.0$ earthquake occurred in Changning, Sichuan Province. Recently, there have been several earthquakes of approximately magnitude 5 in this region, and the causes of earthquake occurrence in this region are controversial. First, based on the gravity profile data, the mapped relationship between the gravity field model data and the measured gravity profile data was determined. Next, the gravity field model data were modified, and high-precision grid data of the study area were obtained by bilinear interpolation. Using the epicenter of the Changning $M_s6.0$ earthquake as the central point, four gravity profiles were extracted, and the characteristics of crustal density variation across the Changning earthquake epicenter were obtained using the density inversion method. The results showed that the accuracy of the fusion data obtained by the calculation of the mapping relationship between the gravity field model data and the measured gravity data was less than 5%. The earthquake clusters in Changning and its surrounding areas corresponded to the Triassic strata, and most occurred along the anticline and syncline. The Changning earthquake was located in the positive, low-value area of 0~30 mGal residual Bouguer gravity anomaly and 0.048~0.058 g/cm³ density, a high-low transition region. This area is at the intersection of the Dadiwan fault on the Changning anticline and a hidden fault on the Shuanghe anticline axis.

本文由中国地震局地震星火计划攻关项目(编号: XH21021)、国家自然科学基金面上基金项目(编号: 42074172)和国家自然科学基金青年基金项目(编号: 42204089)联合资助。

收稿日期: 2023-10-11; 改回日期: 2024-01-11; 网络首发日期: 2024-03-21。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 麻继文, 男, 1996 年生。硕士研究生。研究方向为重力反演。通信地址: 430071, 武汉市武昌区水果湖街道洪山侧路 40 号。E-mail: 21661316@st.cidp.edu.cn。

*通信作者: 吴桂桔, 女, 1983 年生。博士, 副研究员, 硕士生导师。主要从事重力资料处理方法以及正反演研究。通信地址: 430071, 武汉市武昌区水果湖街道洪山侧路 40 号。E-mail: wugjsky@126.com。

This study provided the technical basis for multi-source gravity data fusion and could serve as a dynamic-based seismic physical prediction tool.

Key words: gravity data fusion; Bouguer gravity anomaly; Changning earthquake; density inversion

长宁及周缘区域的地震序列发生在四川盆地南缘盆山的结合带,该区域是研究地震和地壳形变的热点区域(阚荣举等, 1977; Peter et al., 1989; Armijo et al., 1989; 周连庆等, 2008),然而前人的活动构造调查并未发现明显的活动构造(丁国瑜等, 2000)。强烈的地壳运动如青藏高原东南部、欧亚板块和印度板块的相互作用促使该地区地震活动频繁发生,地学研究工作者对川滇及长宁 $M_s6.0$ 地震展开了地壳形变、震源机制解、重力探测等地学探测工作(申重阳等, 2002; 乔学军等, 2004; 易桂喜等, 2008, 2019; 姜永涛等, 2018; 刘敬光等, 2019; 胡晓辉等, 2020; 常祖峰等, 2020; 张杰, 2020; 陈挺等, 2020; Gao et al., 2000; 张毫生, 2020; 韩倩, 2020; 黄春梅等, 2021; 孙权等, 2021),这些研究结果揭示了活动断层的速度结构、上地壳几何形态、重力场变化与成因、长宁背斜的成因与莫霍面深度等。2019年6月17日四川长宁县发生 $M_s6.0$ 级地震,近期该区域多次发生5级左右地震,且长宁 $M_s6.0$ 地震的发震诱因存在争议:(1)长宁 $M_s6.0$ 地震是因局部构造活动所诱发的构造地震(何登发等, 2019; 李大虎等, 2019, 2021; 胡幸平等, 2021; 刘莎等, 2022);(2)长宁地震是由盐矿长期注水导致介质微破裂、孔隙压力扩散而导致的诱发地震(张致伟等, 2018; 左可桢, 2021)。

但上述研究很少涉及对地壳内部结构的探索且在地壳密度结构的研究上存在差异,导致这种差异的原因是缺乏高精度地球物理数据。地震孕育、发展和发生会伴随地壳介质的变化,从而在地壳的密度上有所体现(申重阳等, 2015)。因此,长宁地区地壳密度结构与分布的研究对地震机理的认识及预

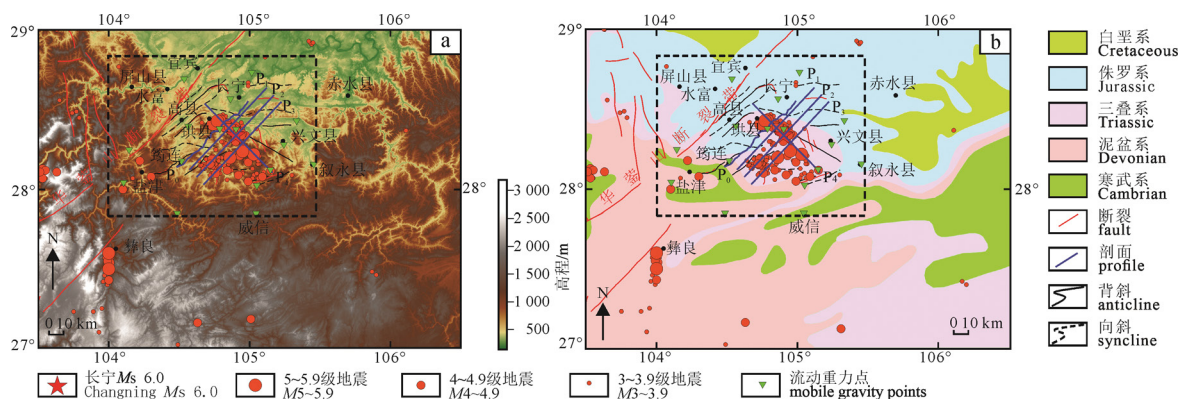
测有重要现实意义。

本研究以长宁地区实测重力剖面数据及流动重力数据为控制基点,将不同分辨率、不同系统下的重力数据融合为统一坐标系下的高分辨率网格数据,采用双线性插值法补齐数据空缺,获取高精度网格数据。以长宁 $M_s6.0$ 地震震中为中心,提取4条重力剖面,并对其进行密度反演,以获取研究区地壳密度差分布特征,分析长宁及周缘地区发震构造。

1 研究区构造背景

研究区位于四川盆地西南缘,西起筠连县东至叙永县。该地区南北狭小,腹地宽广,地势南高北低,南部为中低山地,中北部为丘陵,海拔 245.9~1 408.5 m(见图 1a);研究区发育有白垩纪、侏罗纪、三叠纪、泥盆纪与寒武纪地层(见图 1b),其中侏罗纪地层夹杂白垩纪地层贯穿北部,西南部主要为泥盆纪地层并夹带串珠状寒武纪地层,三叠纪地层成条带状介于侏罗纪地层与泥盆纪地层之间,东部以块状寒武纪、三叠纪地层为主,长宁 $M_s6.0$ 地震发生于研究区中北部的三叠纪地层。

印度板块对青藏高原 NE 向的强烈推挤导致后者的持续隆升以及其深部物质向东移动,而四川盆地的阻挡作用又使得内部物质运移转向东南侧(滕吉文等, 2008),继而形成了震区 NW—SE 向挤压的主要构造背景。研究区内主要发育 NE 走向的华蓥山断裂, NW 向的长宁背斜,该背斜东南宽西北窄,穿过了珙县及高县地区,向东南经过叙永地区(唐永等, 2018),长宁背斜位于川南低缓褶皱带与大凉山—大娄山断褶带之间的过渡区(童崇光, 1992;



a—地形起伏; b—地质构造; P_1, P_2, P_3, P_4 —选取的重力剖面, P_0 —实测重力剖面。

a—topographic undulations; b—geological structure; P_1, P_2, P_3, P_4 —the selected gravity profiles, P_0 —measured gravity profile.

图1 研究区地形起伏与地质构造简图

Fig. 1 Topographic undulations and geological structure in the study area

郭正吾等, 1996; 何登发等, 2011), 具有不同方向上的多期构造变形叠加特征(覃作鹏等, 2013; 邓宾等, 2016); 背斜在川东构造带向西的挤压、龙门山断裂带向东的远程推动及四川盆地、华蓥山断裂带的阻挡作用下形成了现今的构造格局。研究区近五年来发生 3 级以上地震 187 次, 其中 4 级到 4.9 级地震 27 次, 5 级到 5.9 级地震 7 次, 6 级以上地震 1 次, 这些地震主要沿珙县东侧的白象岩狮子滩背斜、双河背斜、大地湾断层与筠连县东侧的玉和背斜、建武向斜、扎子拗断层发生。

2 重力数据融合

2.1 数据来源

实测重力剖面数据共 41 个测点, 测点间距约 1.7 km, 剖面总长约 67 km, 对实测数据进行了正常重力改正, 高度改正, 中间层改正与地形改正; 流动重力点 22 个, 使用千寻精准定位服务, 定位精度达到厘米级, 同时提取了各测点沿线对应的 EGM2008 重力场模型数据 (<http://bgi.obs-mip.gr/data-products/outils/egm2008-anomaly-maps-visualization/>) 的自由空气异常, 进行地形改正后得到布格重力异常, 至此, 已将上述三种数据统一到 WGS84(World Geodetic System 1984)海平面上, 此外还提取了剖面 CRUST1.0 模型中的莫霍面深度值(见表 1)。

2.2 映射关系

本文将实测重力点及流动重力点作为控制点, 以对比分析 EGM2008 布格重力异常数据、实测剖面重力数据和流动重力数据的差异, 模型数据分辨率为 5 km×5 km, 实测剖面的最大点距约为 3.3 km, 最小点距约为 0.7 km, 平均点距约为 1.7 km, 为了方便模型数据插值及保证数据叠加后实测数据的覆盖率, 选取模型数据分辨率的中点分辨率 2.5 km×2.5 km 为输出网格分辨率, 流程如图 2 所示。寻找模型数据与实测数据之间的映射关系, 通过网格插值得到高可信度的 2.5 km×2.5 km 高精度网格数据, 以 P₀ 剖面为例:

表 1 剖面对应的莫霍面起伏

Table 1 Undulations of the Moho surface corresponding to the profile

编号	起伏趋势	最深深度 /km	最浅深度 /km	平均深度 /km
P ₀	NE 向上升	44.90	44.33	44.61
P ₁	NE 向上升	44.77	44.17	44.48
P ₂	NE 向上升	44.69	44.08	44.39
P ₃	NE 向上升	44.60	44.00	44.30
P ₄	SE 向上升	44.76	43.96	44.36

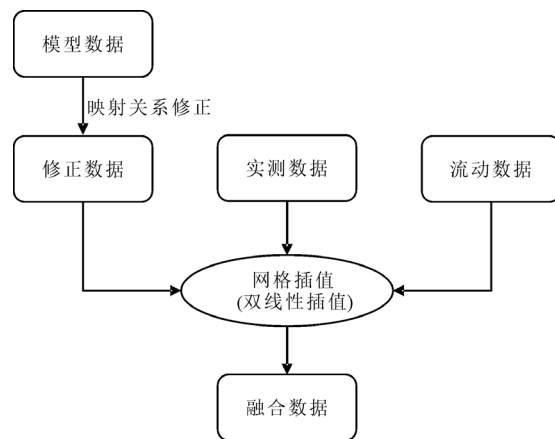


图 2 数据融合流程

Fig. 2 Data fusion process

$$G_f(d) = \frac{G_m(d)}{2} + 67 \times D(d) + f(d) \quad (1)$$

式中, d 为剖面点距, $G_f(d)$ 为融合数据, $G_m(d)$ 为模型数据, $D(d)$ 为测点对应的 CRUST1.0 模型莫霍面深度, $f(d)$ 为实测数据与模型数据在 WGS84 坐标系下关于点距 d 的近似差函数, 该函数由实测数据关于点距 d 的拟合关系式与模型数据关于点 d 的拟合关系式作差得到:

$$f(d) \approx -4.600 \times 10^{-8} \times d^5 + 2.679 \times 10^{-5} \times d^4 - 3.116 \times 10^{-3} \times d^3 + 1.288 \times 10^{-1} \times d^2 - 1.829 \times d \quad (2)$$

点距 d 大小会影响拟合函数的阶次, 点距大时会造成拟合函数低频信息多、拟合阶次较低, 点距小时拟合函数高频信息多、拟合阶次高, 容易造成边缘误差。本文对 41 个样本点采取了五阶次的多项式拟合。

数据均方根误差 $RMSE$ (Root mean square error) 与数据相关性 $CORREL$ (correlation coefficient) 由(3), (4)式给出:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{41} (G_{obsi} - G_{mi})^2}{41}} \quad (3)$$

$$CORREL = \frac{\sum_{i=1}^{41} (G_{obsi} - \overline{G_{obs}}) \times (G_{mi} - \overline{G_m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{41} (G_{obsi} - \overline{G_{obs}})^2 \times (G_{mi} - \overline{G_m})^2}} \quad (4)$$

其中, G_{obs} 为实测数据, $\overline{G_{obs}}$ 为实测数据平均值, G_m 为模型数据, $\overline{G_m}$ 为模型数据平均值。数据融合前后均方根误差 $RMSE$ 由 12.727 720 降低至 2.966 579, 相关系数 $CORREL$ 由 0.905 524 提升至 0.960 354。

如图 3a 所示, 沿线模型布格重力异常与实测布格重力异常在整体趋势上保持一致, 但在局部, 如 10~13 km, 20~27 km, 35~47 km, 55~60 km 处趋势相

反,且模型布格重力异常的局部跳跃较大,实测布格重力异常的局部跳跃较小,整体趋势更为平滑;图 3b 为融合数据与实测数据的趋势走向,沿线融合数据与实测数据走向一致,数值接近且与海拔有较好的反向对应关系。

图 4a 中 P_1 剖面幅值区间为 $-168 \sim -129$ mGal, 其在 4 km、15 km、27 km、50 km 处的跳跃分别对应泥盆纪—三叠纪地层交界、三叠纪—侏罗纪地层交界、侏罗纪—三叠纪地层交界、三叠纪—侏罗纪地层交界;图 4b 中 P_2 剖面在 46 km、55 km、63 km 处的起伏对应双河背斜与大地湾断层、三叠纪—侏罗纪地层交界;图 4c 中 P_3 剖面 15 km、50 km、60 km、70 km 处对应相岭向斜;图 4d 中 P_4 剖面 2 km、8 km、20 km、28 km 处对应符江向斜、侏罗纪—三叠纪地层交界、白象岩狮子滩背斜、双河背斜与大地湾断层。

2.3 双线性插值原理

双线性插值(Kim et al., 2019)是对线性插值的二维运用,输出布格重力异常的值为距离其最近的

2×2 邻域内输入布格重力异常值的加权平均。通过双线性插值可得到正方形内任意点的布格重力值 $g(x, y)$ 。假设已知正方形区域的顶点坐标的布格重力值及其坐标(见图 5) $g_{11}(x_1, y_1)$, $g_{21}(x_2, y_1)$, $g_{12}(x_1, y_2)$, $g_{22}(x_2, y_2)$, 通过双线性插值可得到正方形内任意点的布格重力值 $g(x, y)$:

对 g_{11} , g_{21} 两个点在 x 方向上线性插值得到 $g(x, y_1)$:

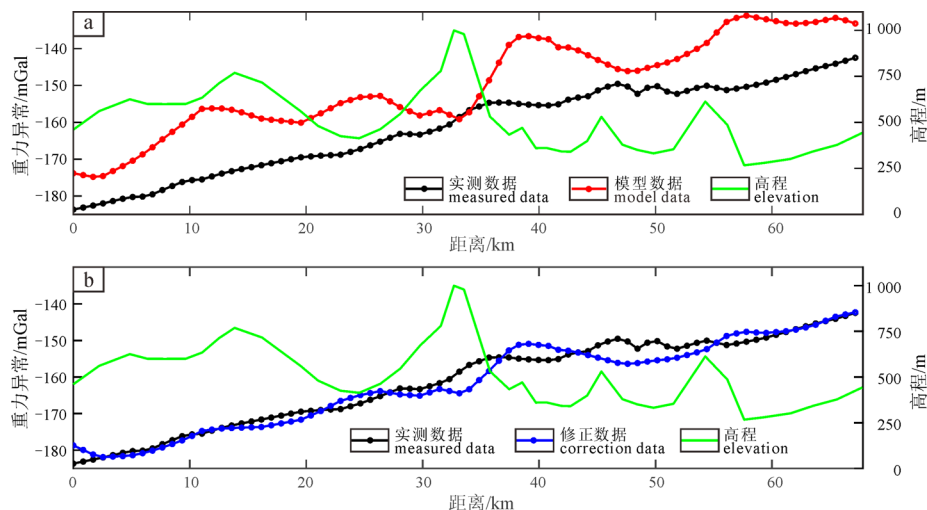
$$g(x, y_1) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} g_{11} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} g_{21} \quad (5)$$

对 g_{12} , g_{22} 两个点在 x 方向上线性插值得到 $g(x, y_2)$:

$$g(x, y_2) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} g_{12} + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} g_{22} \quad (6)$$

对 $g(x, y_1)$, $g(x, y_2)$ 在 y 方向上线性插值得到 $g(x, y)$:

$$g(x, y) = \frac{y_2 - y}{y_2 - y_1} g(x, y_1) + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} g(x, y_2) \quad (7)$$

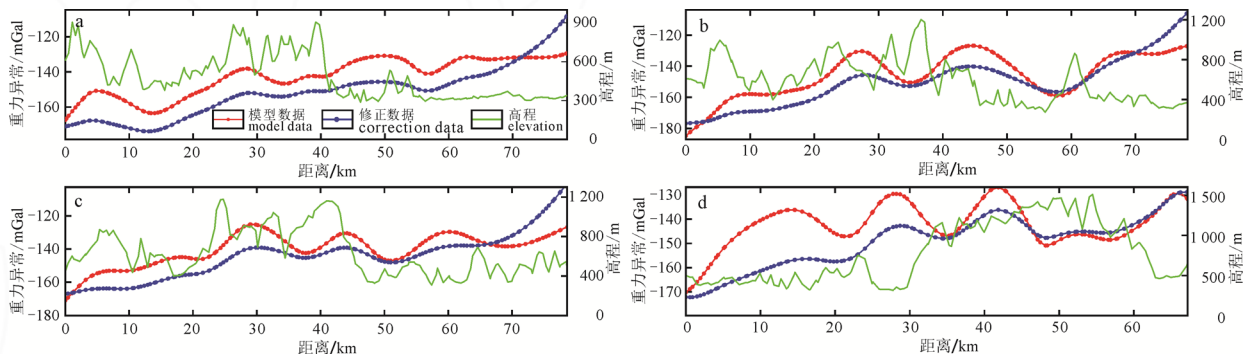


a—融合前; b—融合后。

a—before fusion; b—after fusion.

图 3 实测布格重力异常与测点所对应的模型布格重力异常

Fig. 3 Model of Bouguer gravity anomaly corresponding to the measured Bouguer gravity anomaly



a— P_1 剖面; b— P_2 剖面; c— P_3 剖面; d— P_4 剖面。

a— P_1 profile; b— P_2 profile; c— P_3 profile; d— P_4 profile.

图 4 剖面重力异常图

Fig. 4 Gravity anomaly diagram of profile

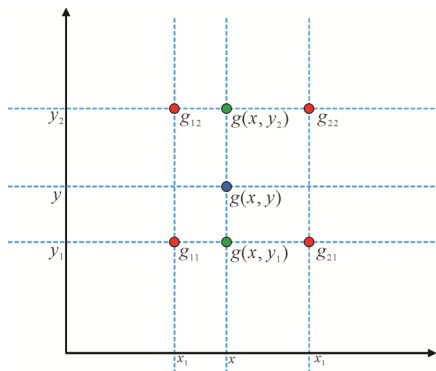


图5 双线性插值示意图
Fig. 5 Bilinear interpolation diagram

将式(5)、(6)式带入(7)式得:

$$g(x, y) = \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g_{11} + \frac{(x - x_1)(y_2 - y)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g_{21} + \frac{(x_2 - x)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g_{12} + \frac{(x - x_1)(y - y_1)}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} g_{22} \quad (8)$$

$$g(x, y) = \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)g_{11} + (x - x_1)(y_2 - y)g_{21} + (x_2 - x)(y - y_1)g_{12} + (x - x_1)(y - y_1)g_{22}}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \quad (9)$$

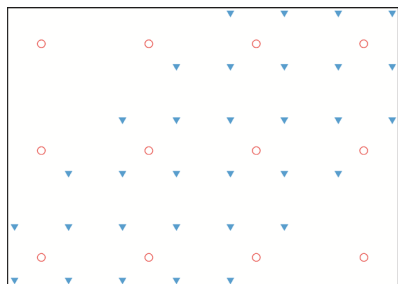
其中 (x, y) 为输出网格节点的坐标, $g(x, y)$ 为输出网格节点的重力异常值。

(2)数据点的个数较少时根据 EGM2008 模型点、邻近输出网格节点两者分别和输出网格节点之间的远近确定贡献,同时利用 EGM2008 模型数据和邻近输出点数据进行插值计算,以距输出网格节点最近的 g_{11} , g_{12} 及邻近输出网格节点 g_x 为例,其经纬度分别为 (x_1, y_1) , (x_1, y_2) , (x_2, y) :

$$g(x, y) = \frac{(x_1 - x)(y_2 - y)g_{11} + (x_1 - x)(y - y_1)g_{12} + (x - x_2)g_x}{(x_1 - x_2)(y_2 - y_1)} + \frac{(x - x_2)g_x}{x_1 - x_2} \quad (10)$$

(3)若输出节点的 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 邻域内存在 EGM2008 数据点个数小于 2 则赋空值。

同理,将上述过程中的 EGM2008 数据换为流动重力和重力剖面的经纬度数据叠加在网格 1 上得到网格 3、网格 4。



圆圈为输出节点,倒三角为 EGM2008 数据点。
Circles are output nodes, inverted triangles are EGM2008 data points.

图6 网格插值示意图
Fig. 6 Grid interpolation diagram

通过双线性插值方法将 EGM2008 地形改正后的布格重力异常数据插值为 $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ 的网格数据。

2.4 数据插值

2.4.1 网格插值

研究区内高精度网格获取如图 6 所示,建立 $2.5 \text{ km} \times 2.5 \text{ km}$ 的网格 1,给出每个输出网格节点的经纬度坐标,读取 EGM2008 数据点的经纬度,将其叠加在网格 1 上,形成新的网格 2,以输出网格节点为中心,查找 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 邻域内的 EGM2008 数据点,并以如下规则赋值(吴桂桔, 2021):

(1)EGM2008 数据点的个数多时根据其输出节点的距离远近确定对输出网格节点的贡献,进行双线性插值计算。以输出网格节点最近的四个点 g_{11} , g_{12} , g_{21} , g_{22} 为例,其经纬度分别为 (x_1, y_1) , (x_1, y_2) , (x_2, y_1) , (x_2, y_2) :

2.4.2 误差修正

(1)将网格 3、网格 4 中数据叠加在网格 1 上进行插值得到网格 5 数据。若输出节点 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 邻域内存在网格 3 和网格 4 数据的情况下:

①网格 5 输出节点处同时存在网格 3 和网格 4 数据时,直接取网格 4 的值。

②网格 5 输出节点上存在网格 3 数据,邻域内存在网格 4 数据时,将网格 3 的数据与由邻域点综合确定的改正值作和进行赋值:

$$g_5 = g_3 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_{4i} - g_{3i}) \quad (11)$$

式中 g_3 为网格 3 重力异常, n 为邻域内网格 4 的数据个数, g_{4i} , g_{3i} 为邻域内其它输出节点的重力异常。

③网格 5 输出节点处存在网格 3 数据,但在邻域内存在网格 4 的数据,则以网格 3 的数据加上由网格 4 所有点共同决定的修正值进行赋值,具体计算公式与式(11)相同,只是计算范围扩大到所有点。

④网格 5 输出节点处不存在网格 3 或网格 4 数据时,赋空值。

(2)按照网格 3 和网格 5 中重力异常数据的映射关系重新赋值,得到网格 6,步骤同 2.4.2(1)。

(3)按照网格 2 和网格 6 中重力异常数据的映射关系重新赋值,得到网格 7,步骤同 2.4.2(1),网格及数据源对应关系如表 2 所示。

2.4.3 数据输出

(1)若网格 7 所有输出节点都不存在空值,则直接对应输出节点经纬度与网格 7 中的重力异常数

表 2 网格及其数据源对应关系表
Table 2 Mapping of grids and their data sources

网格编号	插值数据源
网格 1	空网格(2.5 km×2.5 km)
网格 2	模型数据+网格 1(2.5 km×2.5 km)
网格 3	实测数据+网格 1(2.5 km×2.5 km)
网格 4	流动数据+网格 1(2.5 km×2.5 km)
网格 5	网格 3+网格 4(2.5 km×2.5 km)
网格 6	网格 3+网格 5(2.5 km×2.5 km)
网格 7	网格 2+网格 6(2.5 km×2.5 km)

据, 输出经度、纬度、重力异常三列的形式输出文档。

(2)若网格 7 输出节点中存在任何空值, 则查找该点邻域相关信息, 利用式(9)重新计算该点的重力异常值。最后对应输出节点经纬度与网格 7 中的重力异常数据, 输出经度、纬度、重力异常三列的形式输出文档。

3 研究区重力异常特征

5 级及以上地震与活动断裂及区域重力场密切相关, 约 75%的 5 级及以上地震发生在重力梯级带的弯曲处即布格重力异常低值区或高值区周围(罗翔飞等, 2021)。图 7a 可以看出, 研究区的区域布格重力异常总体上自南西往北东呈低—高展布, 均为重力负异常, 幅值区间约为-280 ~ -80 mGal, 西南部呈负异常高值, 东北部呈负异常低值, 长宁 $M_s6.0$ 地震位于区域布格重力异常负低值区域, 历史地震序列一部分集中在珙县东南侧所处的重力异常负低值区域, 幅值区间约为-150 ~ -100 mGal, 该区域地层高度重合(见图 1b), 且区域东北侧、南侧的高低转换带分别对应三叠纪—侏罗纪地层交界、三叠纪—泥盆纪地层交界, 区域内断层多分布于背斜轴部或周边, 与重力高低梯度带吻合, 例如:

长宁背斜轴部的新街、阴阳背、兴文断层, 白象岩狮子滩背斜和双河背斜东侧的大地湾断层; 另一部分地震分布在彝良县周边的布格重力异常负高值区域, 幅值区间约为-260 ~ -220 mGal, 该区域为华蓥山断裂带西南分支且位于三叠纪、泥盆纪与寒武纪地层交界边缘(见图 1b)。

图 7b 展现了研究区的局部重力异常, 幅值区间约为-50~100 mGal, 整体上呈现网状正负交替分布。长宁 $M_s6.0$ 及周边历史地震集中分布于珙县东侧的局部重力异常正值区域, 幅值区间约为 0~60 mGal, 该区域同时也与三叠纪地层广泛重合, 且区域边缘的珙县东北侧、筠连东南侧存在明显的重力异常正负转换带, 在地层图上与三叠纪—侏罗纪地层交界、三叠纪—泥盆纪—寒武纪地层交界吻合; 震中周边断裂多分布在正负梯度带上, 例如: 兴文县西侧的新街断层、阴阳背断层、兴文断层, 叙永县西侧的猪槽井断层, 筠连东南的孔子拗断层。

4 密度反演及结果

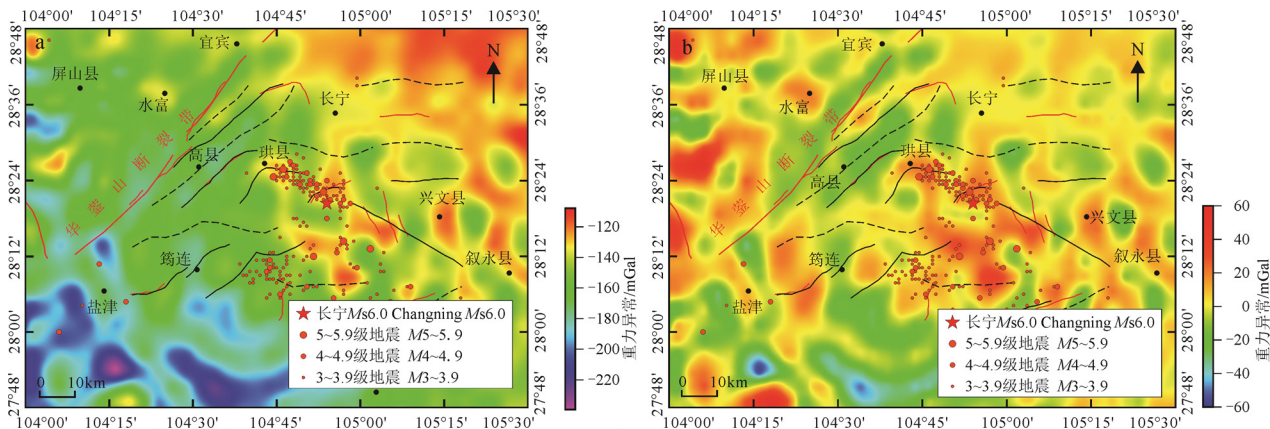
4.1 密度反演原理

视密度成像反演法将地下介质划分为多层和多块网格密度体积模型, 在空间域创建目标函数并采用最优化反演法求解, 从而得到地下介质密度随深度的不均匀分布。假设有一条观测到的重力异常剖面 $d = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ 和一个未知剩余密度模型 $m = \{m_1, m_2, \dots, m_N\}$, d 和 m 由下式给出:

$$Gm = d \quad (12)$$

其中 $G \in (N \times M)$ 是灵敏度核矩阵, 元素 G_{ij} 表示第 j 个密度单元在第 i 个数据点生成的重力异常权重。

剩余密度单元的数量 N 在通常情况下远大于重力异常观测点 M 的数量, 因此方程(12)不能直接求解(VanDecar et al., 1994)。通过引入一些先验约束并使用正则化将密度成像反演问题转换为优化问题,



a—区域重力异常; b—局部重力异常。
a-regional gravity anomaly; b-local gravity anomaly.

图 7 重力异常图

Fig. 7 Gravity anomaly diagram

全局目标函数由下式给出:

$$\phi(m) = \|W_d(d - Gm_0)\|^2 + \mu \|W_m(m - m_0)\|^2 - 2\lambda \sum_{j=1}^N \ln \frac{m_j}{m_{\max}} \quad (13)$$

式(13)的第一项为数据失拟函数, m_0 为初始参考密度模型, W_d 为数据的加权矩阵(Li et al., 2003)。

$$W_d = \text{diag}\{1/\sigma_1^2, 1/\sigma_2^2, \dots, 1/\sigma_M^2\} \quad (14)$$

σ_i 为第 i 个数据点的标准偏差。

式(13)的第二项表示模型的目标函数, μ 是由目标函数和数据失拟函数控制的正则化参数。 W_m 为模型加权矩阵, 由 4 个矩阵组成, 其中任意一个矩阵的形式为:

$$W_{mi} = \alpha_i S_i D_i Z \quad (15)$$

其中 $i = s, x, y, z$ 。 α_i 是一个系数, 它为每个矩阵提供相对权重。 $\frac{\alpha_x}{\alpha_s}$ 、 $\frac{\alpha_y}{\alpha_s}$ 、 $\frac{\alpha_z}{\alpha_s}$ 的比值决定着每个方向的恢复模型的平滑度和建模速度, 比率越大模型就越平滑, 比率越小生成模型的速度越快。本研究选取 $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z$ 保证模型在三个方向上的均衡, 选取 $\alpha_s = 0.05$ 保证适中的迭代速度。 S_s 是一个带有每个单元格权重的对角矩阵, S_x 、 S_y 和 S_z 是带有每个接口在其相应方向上权重的对角矩阵; D_s 是对角矩阵, 其对角线上有 $\sqrt{dxdydz}$, D_x 、 D_y 和 D_z 是各自方向的导数算子。由于构造模型的核函数为线性函数, 重力异常与场源到观测点的距离呈指数衰减, 导致核心矩阵中数值随深度增加而急剧减小, 相同的密度体单元在深部的异常效应比浅层弱。引力与距离的平方成反比, 引入 $(z_0 + z)^{-2}$ 形式的深度加权函数 Z 以抵消衰减:

$$Z = \frac{1}{(z_0 + z)^2} \quad (16)$$

z 是残余密度单元中心的深度, 本文研究的震例震中深度为 16 km, 选取 $z_0 = 1$, $\beta = 3$ 保证震中深度水平的重力异常对实测数据的贡献。

方程(13)的第三项是一个使用对数障碍法施加尾效应的正性的附加正则化项。 λ 是对数常数, m_j 是第 j 个单元的密度, $m_{\max}$ 是可能的最大剩余密度。当 λ 足够小或接近 0 时第三项对式(13)几乎没有贡献, 且上一次迭代中目标函数的变化小于 1% 时目标函数的迭代结束。

为了获取莫霍面以上地壳密度差值分布特征, 本研究中以前述莫霍面起伏趋势为控制, 拟合沿五条剖面的区域趋势项, 以达到去掉莫霍面起伏效应引起的区域布格重力异常为目的, 并采用上述密度反演方法对所获取的莫霍面以上区域剩余布格重力

异常进行密度反演, 获取地壳密度差的分布特征。研究区内莫霍面的平均深度约 44 km, 为了更合理地解释地壳密度分布特征, 本文反演了地壳 30 km 以上区域的密度差分布特征, 且目标函数的变化小于 1% 时, 反演计算结束。

4.2 密度反演

采用视密度成像方法反演了实测重力剖面数据(见图 8a): 在深度 15 km 以上, 共存在 15 个密度差高低转换带, 分别位于剖面起点、8 km、16 km、23 km、28 km、30 km、32 km、35 km、42 km、44 km、46 km、55 km、60 km、63 km、65 km 处, 其中剖面起点、16 km、46 km、55 km 处与筠连鼻状背斜、罗场向斜、白象岩狮子滩向斜、相岭向斜位置对应。剖面起点处的密度差高低转换带对应着寒武纪—泥盆纪地层交界, 筠连鼻状背斜位于交界周边; 7 km 处的高低转换带对应着泥盆纪—三叠纪地层交界; 15~30 km 间的一个负值区域和正值区域横跨侏罗纪地层, 罗场向斜位于正负区域转换带上; 30 km 处的高低转化带对应着侏罗纪—三叠纪地层交界; 27~55 km 区域横跨了三叠纪地层, 囊括了负—正—负三块密度差区域, 白象岩狮子滩背斜位于密度差正负转换带上, 相岭向斜在 55 km 处的负—正密度差转换带上; 55~68 km 为密度差高值区域, 对应着侏罗纪地层; 长宁 $M_s6.0$ 及历史地震多发生在 30~50 km 的三叠纪地层。

为了更好地研究区域内长宁 $M_s6.0$ 地震的发震原因, 在研究区内提取了四条重力剖面 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 进行密度反演, 结果如图 8 所示。 P_1 、 P_2 、 P_3 剖面为三条 NE 向的平行剖面。 P_1 剖面(见图 8b)横跨了巡司场鼻状背斜、罗场向斜、相岭向斜和大地湾断层, 在深度 15 km 以上共存在 14 个密度差正负转换带, 分别位于剖面起点、10 km、24 km、28 km、37 km、43 km、50 km、55 km、60 km、63 km、66 km、68 km、70 km、75 km 处, 其中剖面起点处对应巡司场鼻状背斜, 50 km 处对应相岭向斜; 剖面起点处的密度差正负转换带对应着泥盆纪—三叠纪地层交界, 2~8 km 分布有一个正值区域和一个负值区域, 共同横跨了三叠纪地层; 8~21 km 区域横跨侏罗纪地层, 其中 21 km 处与密度差正值区域较为吻合; 21~50 km 为一段密度差负值区域, 其间的 36 km 处夹杂着一个密度差正值区域, 整个 21~50 km 区域与三叠纪地层吻合; 50 km 处为正负密度差转换带, 邻近的 52 km 处为相岭向斜, 对应着三叠纪—侏罗纪地层交界, 整个 50~78 km 区域都在侏罗纪地层内, 由一个密度差负值区域和一个正值区域交替组成, 其中 65 km 处的正负转换带为二者分界, 对应着附近的白

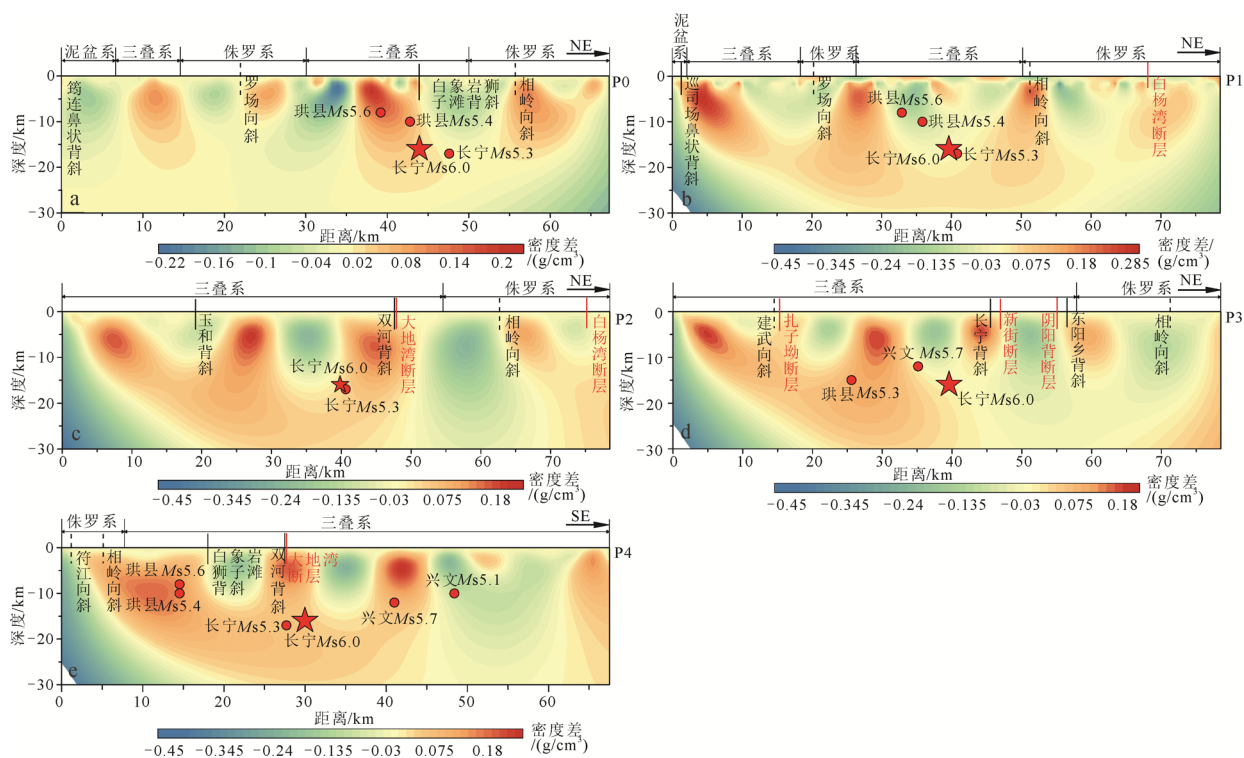
a—P₀剖面; b—P₁剖面; c—P₂剖面; d—P₃剖面; e—P₄剖面。a—P₀ profile; b—P₁ profile; c—P₂ profile; d—P₃ profile; e—P₄ profile.

图8 剖面密度反演

Fig. 8 Profile density inversion

杨湾断层; 长宁 $M_s6.0$ 地震及历史地震集中发生在 21~50 km 区间三叠纪地层内的正负转换带及负值区域。

P₂剖面(见图 8c)横跨了玉和背斜、双河背斜、大地湾断层、相岭向斜、白杨湾断层, 在深度 15 km 以上存在 8 个密度差正负转换带, 分别位于 12 km、24 km、31 km、40 km、51 km、64 km、70 km、74 km 处, 其中 12 km 处对应玉和背斜、64 km 处对应相岭向斜、74 km 处对白杨湾断层; 剖面横跨了三叠纪与侏罗系两大层, 其中三叠纪地层始于剖面起点处的正负转换带上, 该处也是泥盆纪—三叠纪地层的交界, 终于 54 km 处的密度差正负转换带, 该区域沿着剖面方向交替分布着密度差正负区域, 其中的玉和背斜位于 18 km 处的密度差负值区域, 46 km 处的双河背斜与 47 km 处的大地湾断层处在三叠纪地层末端的密度差高值区域, 长宁 $M_s6.0$ 地震与历史地震也集中发生在此区域; 剖面余下的 54~78 km 区域由负—正—负三块密度差区域构成, 其中相岭向斜位于负—正转换带上, 白杨湾断层位于末尾的密度差负值区域, 54 km 附近的密度差正负转换带对应着三叠纪—侏罗纪地层交界, 整个 54~78 km 区域横跨了侏罗纪地层。

P₃剖面(见图 8d)横跨建武向斜、孔子拗断层、长宁背斜、新街断层、阴阳背断层、东阳乡断层和

相岭向斜, 在深度 16 km 以上存在 11 个密度差正负转换带, 位于剖面 2 km、8 km、15 km、18 km、25 km、34 km、43 km、46 km、56 km、64 km、76 km 处, 其中 15 km 对应建武向斜与孔子拗断层, 46 km 处对应长宁背斜与新街断层, 56 km 处对应东阳乡背斜与阴阳背断层; 剖面起点处的视密度正负转换带对应着泥盆纪—三叠纪地层交界, 由起点到 58 km 区域横跨了三叠纪地层, 整个区域由密度差正负区域交替构成, 15 km 附近的建武向斜和孔子拗断层位于负—正密度差转换带上, 45 km 附近的长宁背斜和新街断层处在正—负密度差转换带上, 55 km 附近的阴阳背断层和东阳乡背斜位于负—正密度差转换带上, 56 km 处的密度差正值区域对应着三叠纪—侏罗纪地层交界; 56~78 km 区域由一处密度差正值区域与一处密度差负值区域构成, 二者横跨侏罗纪地层, 72 km 处的相岭向斜位于密度差负值区域; 长宁 $M_s6.0$ 及历史地震集中发生在 20~50 km 的三叠纪地层。

P₄剖面(见图 8e)呈 NW 向, 该剖面自西北向东南横跨了符江向斜, 相岭向斜、白象岩狮子滩背斜、双河背斜、大地湾断层, 在深度 15 km 以上共存在 10 个密度差高低转换带, 分别位于 2 km、17 km、25 km、32 km、37 km、45 km、50 km、54 km、64 km、66 km 处, 其中 2 km 处对应符江向斜, 17 km

处对应白象岩狮子滩背斜, 剖面约 25 km 处的东西两侧为一个低值区域与一个高值区域, 双河背斜与大地湾断层为两者的分界; 剖面起点到 8 km 区域的密度差正值区域跨越了侏罗纪地层, 由 3 km 处的符江向斜与 5 km 处的相岭向斜构成的区域对应着侏罗纪—三叠纪地层交界; 8~67 km 区域由密度差正负区域交替构成, 8~17 km 为密度差正值区域且 17 km 处的密度差正负转换带与白象岩狮子滩背斜对应, 27 km 处的双河背斜与大地湾断层位于密度差正值区域, 长宁 $M_s6.0$ 地震及历史地震多分布于 14~50 km 的三叠纪地层内。

5 讨论

本文通过收集研究区内的实测布格重力异常与 EGM2008 模型数据, 通过模型数据与实测数据间的映射关系将重力数据进行融合, 并利用视密度成像方法对 2019 年 6 月 17 日四川长宁 $M_s6.0$ 地震震中及周边区域的五条剖面进行了密度反演, 获得了震源区及邻区的垂向密度差结构, 展现了研究区内沿重力剖面的上地壳结构特征。综合五条剖面的密度差分布情况及研究区内其他研究成果, 对研究区内长宁周边背斜、向斜、断层和长宁 $M_s6.0$ 地震发震构造进行了综合分析解释:

1) EGM2008 模型数据与实测数据同属 WGS84 坐标系统, 但分别为海平面基准和椭球面基准, 两者在研究区内的差异在 13~14 mGal 范围内。在经过映射关系式计算后, P_1 ~ P_4 剖面的整体趋势变得平滑, 与莫霍面起伏趋势一致, P_1 剖面在 68 km 处的上升趋势更陡, 对白杨湾断层造成的重力异常起凸显作用; P_2 剖面 45 km 处的拐点在计算后移位到了 47 km, 加深了该拐点与由双河背斜、大地湾断层造成的重力异常之间的对应关系, 并且在 70 km 处上升趋势加剧, 凸显了白杨湾断层的重力异常; P_3 剖面计算后在 70 km 处出现拐点, 对应着侏罗纪地层内相岭向斜造成的重力异常; 可见映射关系计算在整体上对区域异常有凸显作用, 还能精确局部异常的位置。

2) 研究区内的震群主要集中在珙县与筠连县东侧的三叠纪地层或其与周围地层的交界区域, 区域内的白象岩狮子滩背斜、双河背斜、大地湾断层周缘地震频发, 近五年 3 级以上地震的发震次数达 187 次。前人在该区域进行的研究显示: 白象岩—狮子滩背斜轴部发育有一系列贯穿寒武纪地层的逆冲断层(何登发等, 2019)与一组规模较大的节理且在构造应力及流体的作用下, 轴部断层构造发生错动、断裂, 导致长宁地震发生(常祖峰等, 2020); 研究区发育有大量盲断层(吴奇等, 2015; Lei et al.,

2019)和微裂缝(何登发等, 2019)。长宁 $M_s6.0$ 地震震深为 16 km, 将该地震震中投影至 P_0 ~ P_4 密度反演结果中, 发现其与多处密度差正负转换带交汇: 震中与 P_0 剖面 45 km 处的密度差正负转换带交汇且位于三叠纪—侏罗纪地层交界附近的双河背斜、大地湾断层下方; 震中与 P_1 剖面 28 km、48 km 两处密度差正负转换带在深度 16 km 处交汇, 该两处转换带对应着侏罗纪—三叠纪、三叠纪—侏罗纪地层交界; 震中与 P_2 剖面 40 km 处的密度差转换带在深度约 16 km 处交汇且该转换带位于三叠纪—侏罗纪地层交界区域附近的双河背斜、大地湾断层斜下方; 震中与 P_3 剖面 33 km、42 km 处密度差正负转换带在深度 16 km 交汇, 且 33 km 处的转换带在深度约 12 km 处与兴文 $M_s5.7$ 地震震中交汇, 震中所处区域为三叠纪—侏罗纪地层交界附近; 震中与 P_4 剖面约 27 km 处的密度差正值区域在 16 km 深度上交汇, 该区域上分布双河背斜、大地湾断层且在其东西两侧为密度差负值区, 西侧的负值区对应着白象岩狮子滩背斜; 据此推测长宁 $M_s6.0$ 发震构造为三叠纪—侏罗纪地层交界区域的大地湾断层、双河背斜轴部存在的隐伏断层, 与上述区域研究结果推断一致。

6 结论

本文通过寻找重力场模型数据与实测重力剖面数据之间的映射关系, 以实测重力剖面数据为基准修正重力场模型数据, 引入双线性插值法提高研究区网格数据精度; 采用视密度成像方法反演了以长宁 $M_s6.0$ 级地震震中为中心点提取的 4 条重力剖面的地壳密度差变化特征, 得到的结论为:

1) 映射关系换算后融合数据的精度小于 5%, 可用于上地壳结构的解释;

2) 双线性插值充分利用现有的数据, 以轻量的实测重力数据为控制点, 提高了数据的分辨率、补齐数据空缺的同时扩大了数据覆盖面积、减小了 EGM2008 重力模型数据在内陆地形起伏较大区域与实测数据之间的误差, 提高了数据可信度与可用度;

3) 重力异常与地壳密度不均匀有关, 而地壳密度又与地质构造密切相关。在去除区域重力异常之后得到的局部重力异常能够反映局部地质体的剩余质量, 对中浅层局部地质构造有很好的展示效果。密度反演结果在垂向上展示了长宁 $M_s6.0$ 地震及周边区域的地壳密度分布, 综合剩余重力异常与密度反演结果, 推断长宁 $M_s6.0$ 地震与局部构造活动有关, 其发震构造为大地湾断层与双河背斜轴部的隐伏断层。

Acknowledgements:

This study was supported by China Earthquake Administration (No. XH21021), and National Natural Science Foundation of China (Nos. 42074172 and 42204089).

参考文献:

- 常祖峰, 张艳凤, 王光明, 等, 2020. 2019年四川长宁 $M_s6.0$ 地震的地质构造成因——区域性构造节理贯通、破裂结果[J]. 地球学报, 41(4): 469-480.
- 陈挺, 严迪, 杨剑, 等, 2020. 基于重力仪静态观测数据研究长宁 6.0 级地震活动性[J]. 四川地震, (3): 35-39.
- 丁国瑜, 张裕明, 方仲景, 等, 2000. 中国活断层图集——全球主要活断层特性的对比[R]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 邓宾, 雍自权, 刘树根, 等, 2016. 青藏高原东南缘大凉山新生代隆升建造过程——多封闭系统低温热年代学与热模型限制[J]. 地球物理学报, 59(6): 2162-2175.
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等, 1996. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社: 48-82.
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3): 589-606.
- 何登发, 鲁人齐, 黄涵宇, 等, 2019. 长宁页岩气开发区地震的构造地质背景[J]. 石油勘探与开发, 46(5): 993-1006.
- 胡晓辉, 盛书中, 万永革, 等, 2020. 2019年6月17日四川长宁地震序列震源机制与震源区震后构造应力场研究[J]. 地球物理学进展, 35(5): 1675-1681.
- 韩伟, 2020. 川南长宁背斜构造几何学特征及形成演化[D]. 成都: 成都理工大学.
- 黄春梅, 吴朋, 李大虎, 等, 2021. 2019年四川长宁 $M_s6.0$ 地震序列 S 波分裂变化特征[J]. 地震学报, 43(3): 303-320.
- 胡幸平, 崔效锋, 张广伟, 等, 2021. 长宁地区复杂地震活动的力学成因分析[J]. 地球物理学报, 64(1): 1-17.
- 姜永涛, 王丽美, 郭广猛, 等, 2018. 川滇地区震间期断层运动引起的重力变化[J]. 地球物理学进展, 33(1): 25-29.
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等, 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, 20(2): 96-109.
- 刘敬光, 万永革, 黄志斌, 等, 2019. 2019年6月17日四川长宁 6.0 级地震中心震源机制解及震源区构造应力场研究[J]. 震灾防御技术, 14(3): 677-685.
- 李大虎, 丁志峰, 吴萍萍, 等, 2019. 川滇交界东段昭通-莲峰断裂带的深部结构特征与 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震[J]. 地球物理学报, 62(12): 4571-4587.
- 李大虎, 詹艳, 丁志峰, 等, 2021. 四川长宁 $M_s6.0$ 地震震区上地壳速度结构特征与孕震环境[J]. 地球物理学报, 64(1): 18-35.
- 罗翔飞, 秦建增, 李洋洋, 等, 2021. 泰安—诸城剖面重力异常和地壳密度结构特征[J]. 地球物理学报, 64(7): 2336-2346.
- 刘莎, 郑钰, 2022. 四川长宁页岩气开采区上地壳各向异性及其变化特征[J]. 地球物理学报, 65(6): 2035-2046.
- 乔学军, 王琪, 杜瑞林, 2004. 川滇地区活动地块现今地壳形变特征[J]. 地球物理学报, 47(5): 806-812.

- 覃作鹏, 刘树根, 邓宾, 等, 2013. 川东南构造带中生代多期构造特征及演化[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(6): 703-711.
- 申重阳, 王琪, 吴云, 等, 2002. 川滇菱形块体主要边界运动模型的 GPS 数据反演分析[J]. 地球物理学报, 45(3): 352-361.
- 申重阳, 杨光亮, 谈洪波, 等, 2015. 维西—贵阳剖面重力异常与地壳密度结构特征[J]. 地球物理学报, 58(11): 3952-3964.
- 孙权, 裴顺平, 苏金蓉, 等, 2021. 2019年6月17日四川长宁 $M_s6.0$ 地震震源区三维速度结构[J]. 地球物理学报, 64(1): 36-53.
- 童崇光, 1992. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京: 地质出版社: 1-33.
- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 等, 2008. 2008 汶川 $M_s8.0$ 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 51(5): 1385-1402.
- 唐永, 周立夫, 陈孔全, 等, 2018. 川东南构造应力场地质分析及构造变形成因机制讨论[J]. 地质论评, 64(1): 15-28.
- 吴桂桔, 2021. 一种多源重力数据融合方法[P]. 湖北省: CN113313190A.
- 吴奇, 梁兴, 鲜成钢, 等, 2015. 地质—工程一体化高效开发中国南海相页岩气[J]. 中国石油勘探, 20(4): 1-23.
- 易桂喜, 闻学泽, 苏有锦, 2008. 川滇活动地块东边界强震危险性研究[J]. 地球物理学报, 51(6): 1719-1725.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等, 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_s6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 62(9): 3432-3447.
- 周连庆, 赵翠萍, 修济刚, 等, 2008. 川滇地区 Lg 波 Q 值层析成像[J]. 地球物理学报, 51(6): 1745-1752.
- 张致伟, 孙小龙, 2018. 四川长宁地区注水诱发地震的孔隙压力扩散特征[J]. 国际地震动态, (8): 132-133.
- 张毫生, 2020. 川南长宁地区地质三维建模与地震构造环境分析[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张杰, 杨光亮, 谈洪波, 等, 2020. 基于接收函数约束的川滇地区莫霍面深度反演研究[J]. 地球物理学报, 63(7): 2579-2591.
- 左可桢, 2021. 四川长宁地区地震活动特征和成因研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.

References:

- ARMIJO R, TAPPONNIER P, HAN Tonglin, 1989. Late Cenozoic right lateral strike slip faulting in southern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research, 94(B3): 2787-2839.
- CHANG Zufeng, ZHANG Yanfeng, WANG Guangming, et al., 2020. The Geological Genesis of the 2019 Changning $M_s6.0$ Earthquake in Sichuan: Connecting and Rupturing of Regional Structural Joints[J]. Acta Geoscientia Sinica, 41(4): 469-480(in Chinese with English abstract).
- CHENG Ting, YAN Di, YANG Jian, et al., 2020. Research on Seismic Activity of Changning $M_s6.0$ Earthquake Based on the Static Observation Data of Gravimeter[J]. Earthquake Research in Sichuan, (3): 35-39(in Chinese with English abstract).

- DING Guoyu, ZHANG Yuming, FANG Zhongjing, et al., 2020. Atlas of Active Faults in China—Comparison of the characteristics of major active faults in the world[R]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration(in Chinese).
- DENG Bin, YONG Ziquan, LIU Shugen, et al., 2016. Cenozoic mountain-building processes in the Daliangshan, southeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence from low-temperature thermochronology and thermal modeling[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(6): 2162-2175(in Chinese with English abstract).
- GAO Yuan, WU Zhongliang, LIU Zheng, et al., 2000. Seismic source characteristics of nine strong earthquakes from 1988 to 1990 and earthquake activity since 1970 in the Sichuan-Qinghai-Xizang (Tibet) zone of China[J]. Pure Applied Geophysics, 157(9): 1423-1443.
- GUO Zhengwu, DENG Kangling, HAN Yonghui, et al., 1996. The Formation and Development of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House: 48-82(in Chinese).
- HE Dengfa, LI Desheng, ZHANG Guowei, et al., 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3): 589-606(in Chinese with English abstract).
- HE Dengfa, LU Renqi, HUANG Hanyu, et al., 2019. Tectonic and geological background of the earthquake hazards in Changning shale gas development zone, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 993-1006(in Chinese with English abstract).
- HU Xiaohui, SHENG Shuzhong, WAN Yongge, et al., 2020. Study on focal mechanism and post-seismic tectonic stress field of the Changning, Sichuan, earthquake sequence on June 17th 2019[J]. Progress in Geophysics, 35(5): 1675-1681(in Chinese with English abstract).
- HAN Qian, 2020. Geometry and evolution of Changning anticline in southern Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- HUANG Chunmei, WU Peng, LI Dahu, et al., 2021. Variation characteristic of S-wave splitting on the 2019 Changning $M_s6.0$ earthquake sequence, Sichuan[J]. Acta Seismologica Sinica, 43(3): 303-320(in Chinese with English abstract).
- HU Xingping, CUI Xiaofeng, ZHANG Guangwei, et al., 2021. Analysis on the mechanical causes of the complex seismicity in Changning area, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(1): 1-17(in Chinese with English abstract).
- JIANG Yongtao, WANG Limei, GUO Guangmeng, et al., 2018. Research on the inter-seismic gravity change due to the fault movements in Sichuan-Yunnan region[J]. Progress in Geophysics, 33(1): 25-29(in Chinese with English abstract).
- KIM K H, SHIM P S, SHIN S, 2019. An alternative bilinear interpolation method between spherical grids[J]. Atmosphere, 10(3): 123.
- KAN Rongju, ZHANG Sichang, YAN Fengtong, et al., 1977. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in southwestern China[J]. Acta Geophysica Sinica, 20(2): 96-109(in Chinese with English abstract).
- LI Y G, OLDENBURG D W, 2003. Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method[J]. Geophysical Journal International, 152(2): 251-265.
- LEI Xinglin, WANG Zhiwei, SU Jinrong, 2019. The December 2018 M-L5.7 and January 2019 M-L5.3 earthquakes in South Sichuan basin induced by shale gas hydraulic fracturing[J]. Seismological Research Letters, 90(3): 1099-1110.
- LIU Jingguang, WAN Yongge, HUANG Zhibin, et al., 2019. Study on Central Focal Mechanism and its Surrounding Tectonic Stress Field of the Changning M6.0 Earthquake in Sichuan[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 14(3): 677-685(in Chinese with English abstract).
- LI Dahu, DING Zhifeng, WU Pingping, et al., 2019. Deep structure of the Zhaotong and Lianfeng fault zones in the eastern segment of the Sichuan-Yunnan border and the 2014 Ludian $M_s6.5$ earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(12): 4571-4587(in Chinese with English abstract).
- LI Dahu, ZHAN Yan, DING Zhifeng, et al., 2021. Upper crustal velocity and seismogenic environment of the Changning $M_s6.0$ earthquake region in Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(1): 18-35(in Chinese with English abstract).
- LUO Xiangfei, QIN Jianzeng, LI Yangyang, et al., 2021. Gravity anomalies and crustal density structure characteristics of profile Tai'an-Zhucheng[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(7): 2336-2346(in Chinese with English abstract).
- LIU Sha, ZHENG Yu, 2022. Seismic anisotropy and variation characteristics of the upper crust in Changning shale gas production area, Sichuan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(6): 2035-2046(in Chinese with English abstract).
- PETER M, HELENE L C, 1989. Fault plane solutions of earthquakes and active tectonics of the Tibetan Plateau and its margins[J]. Geophysical Journal International, 99: 123-153.
- QIAO Xuejun, WANG Qi, DU Ruilin, 2004. Characteristics of current crustal deformation of active blocks in the Sichuan-Yunnan region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(5): 806-812(in Chinese with English abstract).
- QIN Zuopeng, LIU Shugen, DENG Bin, et al., 2013. Multiphase structural features and evolution of Southeast Sichuan tectonic belt in China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(6): 703-711(in Chinese with English abstract).
- SHEN Chongyang, WANG Qi, WU Yun, et al., 2002. GPS inversion of kinematic model of the main boundaries of the rhombus block in Sichuan and Yunnan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 45(3): 352-361(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- SHEN Chongyang, YANG Guangliang, TAN Hongbo, et al., 2015. Gravity anomalies and crustal density structure characteristics of profile Weixi-Guiyang[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(11): 3952-3964(in Chinese with English abstract).
- SUN Quan, PEI Shunping, SU Jinrong, et al., 2021. Three-dimensional seismic velocity structure across the 17 June 2019 Changning $M_s6.0$ earthquake, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(1): 36-53(in Chinese with English abstract).
- TONG Chongguang, 1992. Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation in the Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-33(in Chinese).
- TENG Jiwen, BAI Denghai, YANG hui, et al., 2008. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(5): 1385-1402(in Chinese with English abstract).
- TANG Yong, ZHOU Lifu, CHEN Kongquan, et al., 2018. Analysis of Tectonic Stress Field of Southeastern Sichuan and Formation Mechanism of Tectonic Deformation[J]. Geological Review, 64(1): 15-28(in Chinese with English abstract).
- VANDECAR J C, SNIEDER R, 1994. Obtaining smooth solutions to large, linear, inverse problems[J]. Geophysics, 59(5): 818-829.
- WU Guiju, 2021. A multi-source gravity data fusion method[P]. Hubei: CN113313190A(in Chinese).
- WU Qi, LIANG Xing, XIAN Chenggang, et al., 2015. Geoscience-to-Production Integration Ensures Effective and Efficient South China Marine Shale Gas Development[J]. China Petroleum Exploration, 20(4): 1-23(in Chinese with English abstract).
- YI Guixi, WEN Xueze, SU Youjin, 2008. Study on the potential strong-earthquake risk for the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan active faulted-block, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(6): 1719-1725(in Chinese with English abstract).
- YI Guixi, LONG Feng, LIANG Mingjian, et al., 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 $M_s6.0$ Sichuan Changning earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(9): 3432-3447(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Lianqing, ZHAO Cuiping, XIU Jigang, et al., 2008. Tomography of Q_{lg} in Sichuan-Yunnan Zone[J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(6): 1745-1752(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhiwei, SUN Xiaolong, 2018. Pore pressure diffusion characteristics of water injection induced earthquakes in Changning area, Sichuan Province[J]. Recent Developments in World Seismology, (8): 132-133(in Chinese).
- ZHANG Haosheng, 2020. Three dimensional geological modeling and analysis of seismotectonic environment in Changning area, South Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jie, YANG Guangliang, TAN Hongbo, et al., 2020. Inversion of Moho surface depth in Sichuan-Yunnan area based on the constraint of receiving function[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(7): 2579-2591(in Chinese with English abstract).
- ZUO Kezhen, 2021. Study on the Characteristics and Causes of Seismic Activity in Changning Area, Sichuan Province[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration(in Chinese with English abstract).