

胡敏章, 郝洪涛, 韩宇飞等. 2021. 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震的重力挠曲均衡背景与震前重力变化. 地球物理学报, 64(9): 3135-3149, doi: 10. 6038/cjg2021O0527.

Hu M Z, Hao H T, Han Y F, et al. 2021. Gravity flexural isostasy background of the 2021 Madoi (Qinghai) $M_s7.4$ earthquake and gravity change before the earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(9): 3135-3149, doi: 10. 6038/cjg2021O0527.

2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震的重力挠曲均衡背景与震前重力变化

胡敏章^{1,2,3}, 郝洪涛^{1,2#}, 韩宇飞⁴, 赵云峰⁵, 刘金钊⁶, 郑兵⁷, 张新林^{1,3}, 张毅^{1,2}, 李忠亚^{1,3}, 王嘉沛^{1,3}, 汪健^{1,3}, 尹鹏^{1,3}, 吴云龙^{1,2}, 韦进^{1,2}, 吴桂桔^{1,2}

1 地震大地测量重点实验室, 中国地震局地震研究所, 武汉 430071

2 防灾科技学院, 河北廊坊 065201

3 武汉引力与固体潮国家野外科学观测研究站, 武汉 430071

4 中国地震台网中心, 北京 100000

5 中国地震局第二监测中心, 西安 710000

6 中国地震局第一监测中心, 天津 300000

7 四川省地震局, 成都 610000

摘要 本文综合利用 EIGEN6C4 布格重力异常、SIO V15.1 地形和流动重力观测数据, 研究 2021 年玛多 $M_s7.4$ 地震的重力挠曲均衡背景和震前重力变化特征. 首先, 基于岩石圈挠曲均衡模型, 结合布格重力异常和地形数据, 采用有限差分方法计算了震中及周边地区(青藏高原东北部)岩石圈有效弹性厚度(T_e)和挠曲均衡重力异常. 结果表明, 青藏高原东北部 T_e 为 0~100 km, 横向差异明显, 且与块体构造关系密切. 巴颜喀拉块体以北的柴达木块体 T_e 值高达 50~80 km, 以南的羌塘块体大部分区域的 T_e 大于 20 km, 五道梁以南出现局部大于 30 km 的高值区, 玉树-德格地区出现局部大于 40 km 的高值区. 巴颜喀拉块体 T_e 为 0~20 km, 较其南北块体明显偏小, 更易于发生形变, 从而在南北“夹持”下发生物质东向运动, 是青藏高原中部物质东流的主要区域. 地震易发生在岩石圈强弱变化的过渡地带(T_e 变化梯度带), 以及 T_e 较小区域的断裂带上. 本次地震即发生在巴颜喀拉块体内部 T_e 低值区, 震中附近有效弹性厚度约为 15 km. 震前流动重力变化分析表明, 2015 年以来 3~5 年的累积重力变化自西向东呈负-正-负的区域性变化特征, 大致以震中为界形成了垂直于断裂带的重力变化高梯度带, 主要反映了震前青藏高原物质东流过程中出现的深部构造运动态势. 2018 年以来的重力变化主要呈围绕震中形成西正-东负的弱区域性变化特征, 显示震中地区已处于高应力应变的“固化”状态, 地震即发生在重力变化零值线拐弯部位.

关键词 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震; 重力均衡; 岩石圈有效弹性厚度; 重力场变化

doi: 10. 6038/cjg2021O0527

中图分类号 P312

收稿日期 2021-06-22, 2021-08-05 收修定稿

Gravity flexural isostasy background of the 2021 Madoi (Qinghai) $M_s7.4$ earthquake and gravity change before the earthquake

HU MinZhang^{1,2,3}, HAO HongTao^{1,2#}, HAN YuFei⁴, ZHAO YunFeng⁵, LIU JinZhao⁶, ZHENG Bing⁷, ZHANG XinLin^{1,3}, ZHANG Yi^{1,2}, LI ZhongYa^{1,3}, WANG JiaPei^{1,3}, WANG Jian^{1,3}, YIN Peng^{1,3}, WU YunLong^{1,2}, WEI Jin^{1,2}, WU GuiJu^{1,2}

基金项目 地震科技星火计划攻关项目(XII20039), 重点研发计划(2018YFC1503503-01), 国家自然科学基金面上项目(41974021)资助.

第一作者简介 胡敏章,男,副研究员,主要从事重力场均衡理论、重力场及其变化监测与地震分析预报研究. E-mail: huminzhang@126.com

共同第一作者简介 郝洪涛,男,副研究员,主要从事流动重力监测、数据处理与地震分析预报. E-mail: haoht2004@sina.com

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

2 Institute of Disaster Prevention, Hebei Langfang 065201, China

3 National Observation and Research Station of Gravitation and Earth Tide, Wuhan 430071, China

4 China Earthquake Networks Center, Beijing 100000, China

5 The Second Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Xi'an 710000, China

6 The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300000, China

7 Sichuan Earthquake Administration, Chengdu 610000, China

Abstract In this paper, the flexural isostasy and gravity variations before the 2021 M_s7.4 earthquake were studied using the EIGEN6C4 Bouguer gravity anomalies, SIO V15.1 topography model and the repeated gravimetry data. Firstly, based on the lithospheric flexural isostatic model, combining with Bouguer gravity anomalies and topography data, the effective elastic thickness (T_e) and the flexural isostatic gravity anomalies of the lithosphere in the epicenter and its surrounding area (northeastern Qinghai-Tibet Plateau) were calculated using the finite difference method. The results show that T_e ranges from 0 to 100 km in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau, with obvious lateral changes and close relationship with block tectonic structures. To the north of the Bayan Har block, T_e of the Qaidam block is as high as 50~80 km, to the south, T_e of the Qiangtang block is larger than 20 km, with local high values larger than 30 km in the south of Wudaoliang and larger than 40 km around Yushu-Dege area. T_e of the Bayan Har block is 0~20 km, which is smaller than that of the north and south blocks, and it is more prone to deformation. Therefore, the mass in the Bayan Har block moves eastward under the north and south holding, and it is the primary area of eastward material flow in the central part of the Qinghai-Tibet Plateau. Earthquakes are prone to occur in the transition zones of lithospheric strength change (T_e gradient zones), as well as on the faults where T_e is low. The Madoi M_s7.4 earthquake occurred in the area with low T_e inside the Bayan Har block, with an effective elastic thickness of about 15 km near the epicenter. The analysis of repeated gravimetry data before the earthquake shows that the 3~5 years' accumulated gravity variations since 2015 present a regional change characteristic of negative-positive-negative from west to east, and a high gradient zone of gravity variation perpendicular to the fault zone is formed with the epicenter as the boundary, which mainly reflects the deep tectonic movement situation in the process of material flow from the Qinghai-Tibet Plateau to east before the earthquake. The gravity variations since 2018 is mainly characterized by a weak regional change from positive in the west to negative in the east around the epicenter, which shows that the epicenter area has been in the "solidification" state of high stress and strain, and the earthquake occurred at the turning point of the zero value line of gravity variations.

Keywords The 2021 Madoi (Qinghai) M_s7.4 earthquake; Gravity isostasy; Lithospheric effective elastic thickness; Gravity variations

0 引言

2021年5月22日,青海省果洛藏族自治州玛多县发生 M_s7.4 地震,震中位于巴颜喀拉块体北边界以南(98.34° E, 34.59° N)、震源深度 17 km(中国地震台网),初步判断发震断裂为玛多—甘德断裂带

(詹艳等,2021),地震序列精定位显示发震断裂为昆仑山口—江错断裂(王未来等,2021),GCMT 的快速震源机制解显示本次地震为走滑兼正断性质事件。地震所在的巴颜喀拉块体是 21 世纪以来我国 M_s7.0 大震活动的主体区域,其东部地区近十余年以来就先后发生过 2008 年四川汶川 M_s8.0、2010 年青海玉树 M_s7.1、2013 年四川芦山 M_s7.0、2017

年四川九寨沟 $M_s7.0$ 等大地震。

大地震的孕育和发生与活动块体边界构造密切相关(张培震等,2013)。块体边界带往往是地壳构造变化区域,可能呈现与强震孕育相关的重力场均衡背景(王谦身等,2008;张永谦等,2010;陈石等,2011;付广裕等,2015;付广裕和王振宇,2020)。震前更有可能观测到显著的重力变化(贾民育和詹洁晖,2000;申重阳等,2009;祝意青等,2015),且依据重力变化范围、量级,及其时间演化过程,可以对强震地点进行一定程度的中长期预测(祝意青等,2018;胡敏章等,2019)。因此,开展大震震区重力均衡背景和震前重力场变化的研究对深入理解其孕育和发生机理、提高未来区域强震预测能力均有较重要意义。

本文拟基于岩石圈挠曲均衡模型,利用 EIGEN6C4 重力场模型(<http://icgem.gfz-potsdam.de>)和 SIO V15.1 地形数据(<http://topex.ucsd.edu>),计算震区及周边岩石圈有效弹性厚度(T_e , effective elastic thickness)和挠曲均衡重力异常,分析区域孕震环境;利用地震流动重力监测资料,提取震前重力场变化图像,分析区域重力变化过程。研究结果可为区域大地构造环境、大震孕育机理等研究,以及后续震情演化分析提供参考。

1 区域构造背景

新生代以来印度—欧亚板块的持续碰撞造成了青藏高原的剧烈隆升、地壳缩短和增厚(Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004; Gan et al., 2007),并形成了主要以大型走滑断裂带为边界的活动块体构造(张培震等,2003)。其中,巴颜喀拉块体是目前地震最为活跃的区域,中国大陆近 20 年来所有 $M_s7.0$ 以上地震均发生在该块体周缘。

巴颜喀拉块体北边界为东昆仑断裂带,是一条近 EW 走向的巨型左旋走滑断裂带,是控制青藏高原物质东向运动的重要边界带(Tapponnier, 2001)。自西向东,断裂带滑动速率逐步减小,由西部格尔木—玛沁段约 $10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 向东衰减至玛曲段约 $5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,至东部末端的塔藏段进一步衰减至 $3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下(Van der Woerd et al., 2000, 2002; 李陈侠, 2009; Ren et al., 2013)。震源机制解也显示,东昆仑断裂带主要发生左旋走滑型地震(闻学泽等, 2011)。

巴颜喀拉块体南边界为甘孜—玉树—鲜水河断裂带,是一条 NW 向左旋走滑断裂带。甘孜—玉

树—鲜水河断裂带总体左旋走滑运动速率较大,其中玉树断裂带晚更新世晚期以来平均速率为 $12.5 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,而鲜水河断裂带平均约 $10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (闻学泽等,2003,2011)。整个边界断裂带均强震活跃,尤其是作为巴颜喀拉和川滇菱形块体边界的鲜水河断裂带,自有地震记录以来就发生过 8 次 $M_s7.0$ 以上大地震。

向东运动的巴颜喀拉块体被四川盆地阻挡,形成龙门山逆冲推覆构造带,为其东边界。龙门山构造带自西向东主要由汶川—茂县断裂、映秀—北川断裂和灌县—江油断裂等三条主干断裂组成,呈叠瓦状向四川盆地内逆冲推覆,约到 20 多公里深处合并形成一条剪切带(张培震等,2008)。地震地质研究的万年时间尺度和 GNSS 观测的现今地壳运动速率均表明,龙门山构造带形变以水平缩短—挤压逆冲为主、伴有水平剪切运动(张培震等,2008;闻学泽等, 2011)。

除边界带外,巴颜喀拉块体内部也发育有一系列断裂带。其中,龙日坝断裂带东西两侧 GNSS 运动速率明显不同,是块体内部构造分界带,将巴颜喀拉块体分成东南部的龙门山次级块体和西北部的阿坝次级块体(徐锡伟等,2008;陈长云等,2013)。龙门山次级块体内部除龙门山构造带外,还分布有岷江断裂带、虎牙断裂带等,与塔藏断裂等构成东昆断裂带东端的系列分支断裂。2017 年九寨沟 $M_s7.0$ 地震即发生在岷江、虎牙、塔藏三条断裂带交汇部位(徐锡伟等,2017)。阿坝次级块体内部主要分布有 NW 向的玛多—甘德、达日、五道梁—长沙贡玛等系列左旋走滑断裂带。达日断裂带控制了 1947 年达日 $M_s7.7$ 地震,而玛多—甘德断裂带则初步判定为本次 $M_s7.4$ 地震的发震断层(梁明剑等,2014,2020;詹艳等,2021)。

2 岩石圈有效弹性厚度与均衡重力异常计算

2.1 计算方法

根据岩石圈挠曲均衡模型, Moho 面在地形等载荷作用下将发生挠曲形变,而岩石圈有效弹性厚度(T_e)是决定其形变量的关键参数之一(Watts, 2001)。通过对地形和重力异常数据进行谱分析等,可定量计算岩石圈有效弹性厚度,为区域地震构造背景研究提供参考(McNutt, 1979; Kirby, 2014; 郑勇等, 2012; 李永东等, 2013; 陈波, 2013)。

本节利用 SIO V15.1 地形数据(图 1)和 EIGEN6C4 重力异常(图 2), 基于空域法计算玛多 $M_s7.4$ 地震震区及周边岩石圈有效弹性厚度及均衡重力异常(赵俐红等, 2004; Jordan and Watts, 2005; 姜效典等, 2014; 胡敏章等, 2020). 与谱分析方法相比, 空域

法具有可顾及岩石圈强度横向变化的优势. 根据岩石圈挠曲均衡模型, 在地形载荷 q (可记为 $\rho_c gh$) 和水平应力场 ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$) 作用下, 岩石圈的挠曲形变(以 Moho 挠曲表征)微分方程为(van Wees and Cloetingh, 1994)

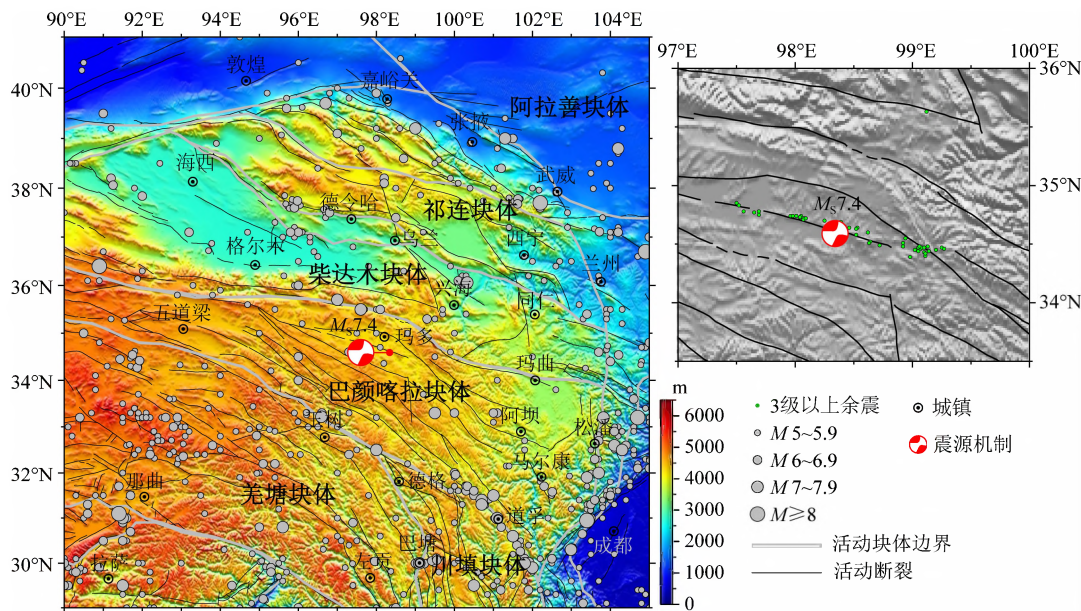


图 1 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震震区及周边地形与大地构造

震源机制解为 GCMT 快速解, 历史 $M_s5.0$ 以上地震为来自中国地震台网 (<https://news.ceic.ac.cn/>) 1500 年以来地震记录, 3 级以上余震为截止到 5 月 27 日的中国地震台网记录. 地形数据为来自斯克利普斯海洋研究所的地形模型 SIO V15.1.

Fig. 1 The tectonic settings around the Madoi $M_s7.4$ earthquake area

The focal mechanism solution is the fast solution of GCMT, and the historical earthquakes larger than $M_s5.0$ are from China seismic network (<https://news.ceic.ac.cn/>), according to the records of earthquakes since 1500, the aftershocks with $M_s \geq 3.0$ are records from China seismic network before May 27, 2021. The background topography model is downloaded from Scripps Institute of Oceanography, SIO V15.1.

$$\begin{aligned}
 & D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + D \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2D \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + 2 \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
 & + \nu \frac{\partial^2 D}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial x \partial y^2} + 2 \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial^3 w}{\partial x^2 \partial y} + 2(1-\nu) \frac{\partial^2 D}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\
 & = q + d\rho g w + \sigma_{xx} T_e \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_{yy} T_e \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\sigma_{xy} T_e \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}, \tag{1}
 \end{aligned}$$

式中岩石圈抗挠刚度 $D = ET_e^3/12(1-\nu^2)$, E 为杨氏模量, T_e 为岩石圈有效弹性厚度, w 为岩石圈挠曲, ν 为泊松比, $d\rho = \rho_m - \rho_c$ 为地幔密度与挠曲填充物质密度之差.

当顾及岩石圈有效弹性厚度的横向变化时, 可采用有限差分方法求其数值解, 即以中心差分公式代替(1)式中的偏导数, 将此偏微分方程转换成线性方程组以获得其数值解, 即

$$\mathbf{AW} = \mathbf{H}, \tag{2}$$

式中 $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_{MN-1}, w_{MN})^T$, $\mathbf{H} =$

$C_2(h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_{MN-1}, h_{MN})^T$ 为 MN 行列向量 (以从左到右、从上到下的顺序排列), $C_2 = \frac{\rho_c g}{D} dx^4$, \mathbf{A} 为 $MN \times MN$ 对角稀疏矩阵.

基于岩石圈挠曲均衡理论, 以地形数据为输入载荷, 根据公式(2)计算地形载荷作用下产生的 Moho 面挠曲, 进而计算 Moho 面挠曲引起的布格重力异常, 当布格重力异常的计算值与观测值之差的均方根 RMS(Root Mean Square)达到最小时, 获得 T_e 计算结果, 同时区域布格重力异常计算值与

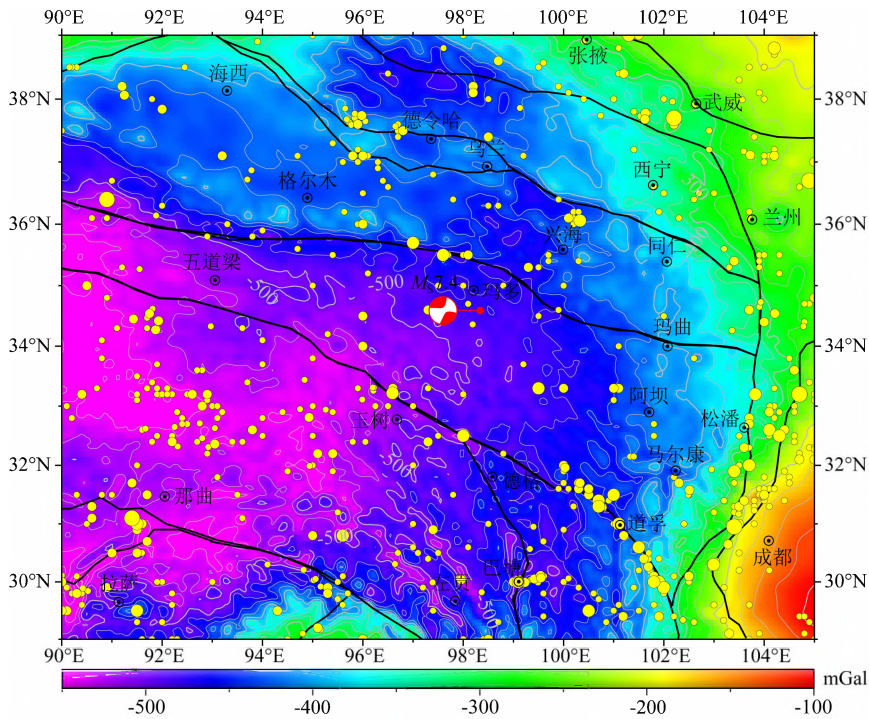


图 2 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震震区及周边 EIGEN6C4 模型布格重力异常 ($1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 2 The EIGEN6C4 Bouguer gravity anomalies around the Maduo $M_s7.4$ earthquake, 2021, in Qinghai Province ($1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

观测值之差即为挠曲均衡重力异常. 计算过程中采用表 1 所示的平均地壳参数, 具体数据处理流程参见胡敏章等 (2020).

表 1 岩石圈有效弹性厚度计算时采用的平均地壳参数

Table 1 The theoretical crustal parameters for calculating of T_e

参数	取值	参数	取值
地幔密度 ρ_m	$3270 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	杨氏模量 E	$10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$
地壳密度 ρ_c	$2670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	泊松比 ν	0.25
填充密度 ρ_m	$2670 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	网格尺寸 dx, dy	20000 m
地壳平均厚度	30000 m		

2.2 计算结果

玛多 $M_s7.4$ 地震震中及周边地区岩石圈有效弹性厚度计算结果见图 3, 挠曲均衡重力量见图 4.

从图 3 可以看出, 巴颜喀拉块体及周边地区岩石圈有效弹性厚度为 $0 \sim 100 \text{ km}$, 在青藏高原内部一般小于 70 km . 总体上, 巴颜喀拉块体岩石圈有效弹性厚度较周边块体小, 约为 $0 \sim 20 \text{ km}$, 即岩石圈强度相对较弱, 其内部岩石圈有效弹性厚度自西向东呈减小趋势. 北部祁连块体岩石圈有效弹性厚度较小, 大部分地区为 $0 \sim 30 \text{ km}$; 柴达木块体大部分有效弹性厚度在 30 km 以上, 特别是柴达木盆地格尔木至海西等地区有效弹性厚度达 $50 \sim 80 \text{ km}$, 岩

石圈强度相对较大. 南部羌塘块体大部分地区有效弹性厚度大于 20 km , 且在块体东部玉树-德格地区存在局部高值, 有效弹性厚度达 40 km 以上. 东部四川盆地为稳定地块, 成都以东地区岩石圈有效弹性厚度达 50 km 以上. 因此, 巴颜喀拉块体处于“南北夹持、东部受阻”的构造态势, 强震主要发生在岩石圈强度快速变化的“梯度带”地区, 以及有效弹性厚度较小 ($< 10 \text{ km}$) 的区域. 玛多 $M_s7.4$ 地震发生在巴颜喀拉块体北部岩石圈强度较弱的区域, 有效弹性厚度约 15 km .

根据地壳均衡理论, 基于与真实地球均衡状态更匹配的均衡模型计算获得的均衡重力异常量值应更小、分布也应更“平缓”. 从图 4 看, 巴颜喀拉块体及周缘地区挠曲均衡重力异常幅度大多在 $\pm 20 \text{ mGal}$ ($1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) 以内, 变化平缓, 显示该区域岩石圈符合挠曲均衡模式, 也间接说明图 3 所示岩石圈有效弹性厚度计算结果是可靠的. 巴颜喀拉块体边界上的较明显均衡重力异常主要分布在两个地区, 一是格尔木以南的北边界地区, 沿断裂带存在自南向北由负向正的均衡重力异常条带; 二是东部的龙门山断裂带及三岔口地区, 沿断裂带分布有正负交替的局部均衡重力异常. 这些均衡重力异常较突出的地区, 也是 $M_s7.0$ 以上地震多发的区域.

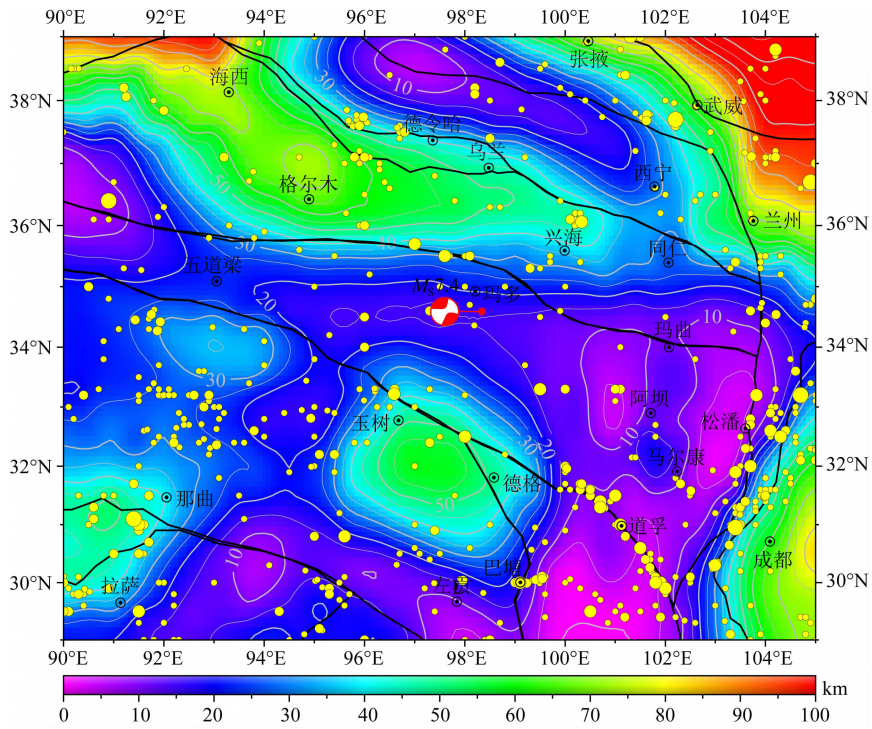


图 3 2021 年青海玛多 $M_s 7.4$ 地震震区及周边岩石圈有效弹性厚度计算结果

Fig. 3 The lithospheric effective elastic thickness (T_e) around the Madoi $M_s 7.4$ earthquake, 2021, in Qinghai Province

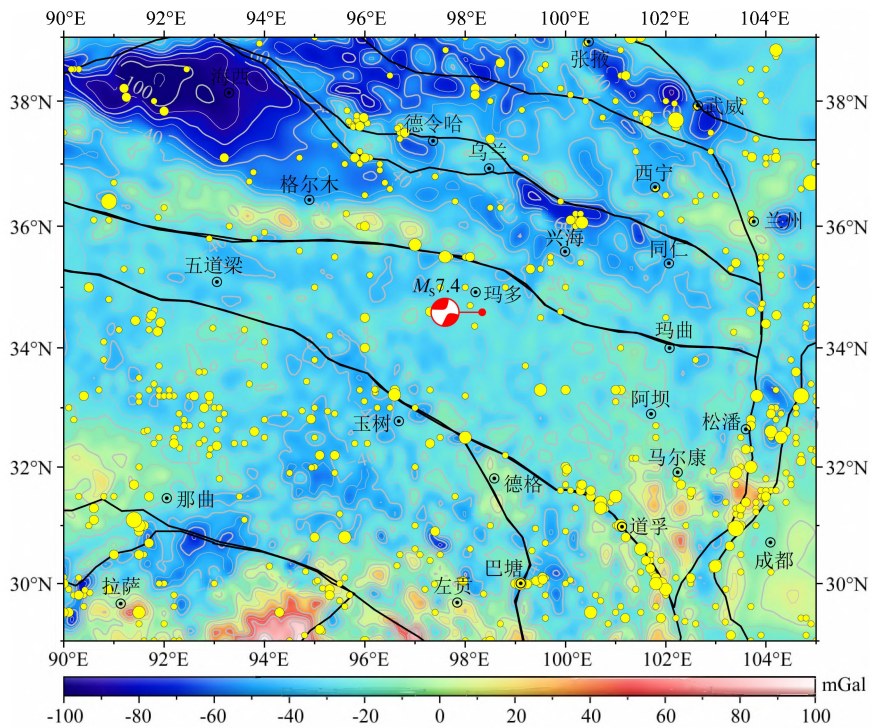


图 4 2021 年青海玛多 $M_s 7.4$ 地震震区及周边挠曲均衡重力异常计算结果 ($1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 4 The calculated flexural isostatic gravity anomalies around the Madoi $M_s 7.4$ earthquake, 2021, in Qinghai Province ($1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

3 震前重力变化

3.1 地震流动重力监测概况

自 1998 年以来,中国地震局联合国家测绘地理信息局、中国科学院等多部委建立了全国性的流动重力监测网络,每 2~3 年进行一次复测. 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震后,中国地震局通过综合地球物理场观测等项目,在青藏高原东缘建立了区域地震流动重力监测网. 2017 年,湖北省地震局(中国地震局地震研究所)牵头,将全国流动重力监测网进行了整合优化,形成了覆盖中国大陆的重力监测网,并计划每年开展 1~2 期观测,获取重力场变化信息,为地震分析预报和地球科学研究提供基础数据.

图 5 所示为玛多 $M_s7.4$ 级地震震区及周边流动重力测网,由 21 个绝对重力测点和 450 个相对重力联测点组成. 青藏高原东部地区,2018 以前,每 2~3 年观测 1 期,2018 年以来每年观测 1 期;位处南北地震带、河西走廊的四川、甘肃等地区,每年观测 2 期. 需要注意的是,青海省内格尔木—五道梁测线与玛多—玉树测线之间的南北两条连接线均是

2017 年青藏高原东缘测网改造时增加的测线,2018 年以来才形成稳定可靠的观测.

流动重力观测采用绝对重力控制下的相对重力联测方法完成. 绝对重力测量主要由湖北省地震局采用 FG5 型高精度绝对重力仪完成、部分测点由中国地震局第二监测中心利用 A10 型便携式绝对重力仪完成;相对重力联测则由中国地震局第二监测中心、四川省地震局、中国地震局第一监测中心、湖北省地震局等采用 BURRIS、LCR、CG5/6 等型号的高精度相对重力仪完成.

为保持区域数据资料完成性,本文主要对 2015 年以来每年 9 月前后观测获取的流动重力资料进行了处理. 以绝对重力为起算基准,采用经典平差方法计算了测网每期重力点值,并通过作差计算获取了测点重力变化. 相对重力仪的格值等参数采用绝对重力控制下的直接计算结果,各期数据选用、仪器参数见表 2,数据解算精度情况见表 3. 从表 3 看,各期计算结果点值精度约为 $2\sim30\times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,4 个年度观测结果点值平均精度均优于 $15\times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,2018—2020 年的点值平均精度更是优于 $10\times 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,显示流动重力观测精度较高,数据处理结果可靠.

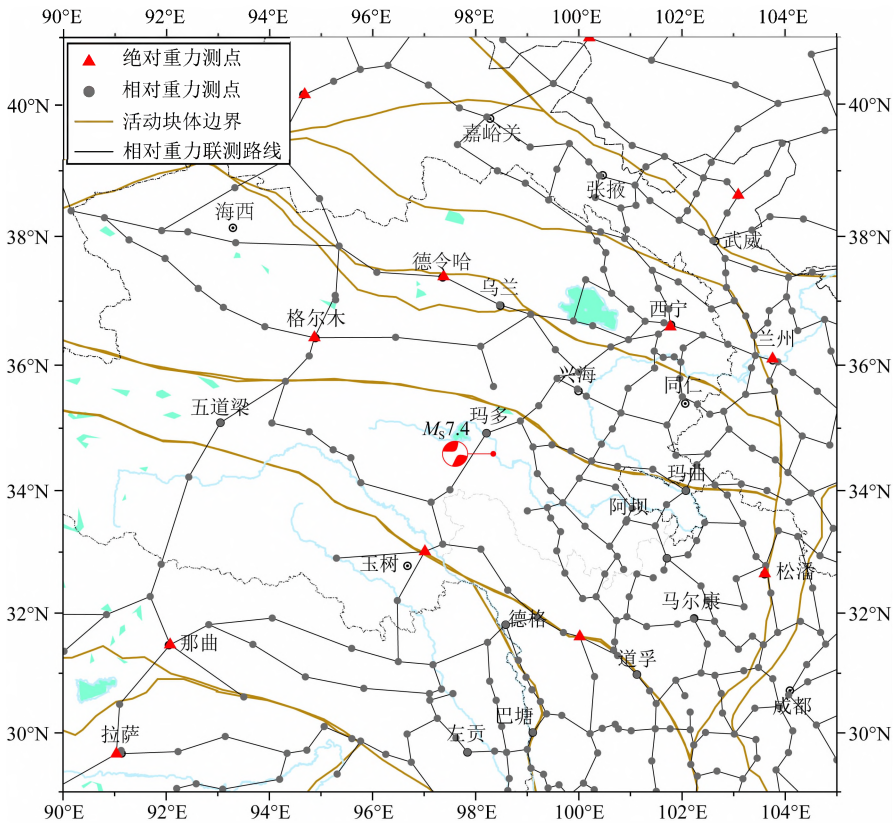


图 5 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震震区及周边流动重力测网

Fig. 5 The repeated gravimetry network around the Madoi $M_s7.4$ earthquake, 2021, in Qinghai Province

表 2 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震震区及周边流动重力数据选用、仪器参数统计
 Table 2 Statistics about the selected gravimetry data and instruments' parameters used around
 the Madoi $M_s7.4$ earthquake, 2021, in Qinghai Province

观测年份	绝对重力点	相对重力测区	相对重力仪编号及格值参数
2015	拉萨、那曲、格尔木、德令哈、敦煌、高台、西宁、兰州、松潘、郫县、甘孜、玉树	二测中心甘青藏测区 物探中心甘南测区 四川局四川测区 自然资源部第一大地测量队藏南测区	BURRIS-B050;1.010729 BURRIS-B054;1.000181
			BURRIS-B057;1.000501 BURRIS-B095;0.999833
			LCR-G854;0.999751 LCR-G843;1.000646
			LCR-G1132;1.000932 LCR-G793;1.000453
			LCR-G818;1.000364 BURRIS-B052;1.000031
			BURRIS-B070;0.999917 BURRIS-B075;0.999987
			BURRIS-B051;0.999912 BURRIS-B085;1.000031 LCR-G920;0.999797
2018	拉萨、那曲、格尔木、德令哈、敦煌、高台、西宁、兰州、松潘、郫县、甘孜、玉树、林芝、昌都、芒康、雅安、班玛、玛曲、民勤、鼎新、玛沁	二测中心甘青藏测区 一测中心藏东测区 四川局四川测区	CG5-C1229;0.999234 CG5-C1235;0.999898
			CG5-C1427;1.000044 CG5-C216;1.001502
			BURRIS-B086;0.999931 BURRIS-B101;0.999469
			BURRIS-B105;0.999548 BURRIS-B115;0.999572 LCR-1149;1.000010 LCR-1150;0.988500
2019	拉萨、那曲、格尔木、德令哈、敦煌、高台、西宁、兰州、松潘、郫县、甘孜、玉树、林芝、昌都、芒康、雅安、班玛、玛曲、民勤、鼎新、玛沁	二测中心甘青藏测区 一测中心藏东测区 四川局四川测区	CG5-C1229;0.999225 CG5-C1235;0.999931
			CG5-C1427;1.000079 CG5-C207;0.990215
			BURRIS-B086;0.999910 BURRIS-B101;0.999416
			BURRIS-B095;0.999834 BURRIS-B105;0.999534 BURRIS-B115;0.999125
2020	拉萨、那曲、格尔木、德令哈、敦煌、高台、西宁、兰州、松潘、郫县、甘孜、玉树、林芝、昌都、芒康、雅安、班玛、玛曲、民勤、鼎新、玛沁	二测中心甘青藏测区 四川局四川测区 湖北局藏东测区	BURRIS-B086;0.999936 BURRIS-B101;0.999456
			BURRIS-B105;0.999561 BURRIS-B115;0.999220
			CG6-090;0.999873 CG6-093;1.001026
			CG6-236;0.999885 CG6-238;1.000118

表 3 2021 年青海玛多 $M_s7.4$ 地震震区及
 周边流动重力数据解算精度(单位: $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)
 Table 3 Statistics of the gravimetry data processing
 accuracy around the Madoi $M_s7.4$ earthquake, 2021,
 in Qinghai Province (Unit: $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

观测年份	点值精度 最大值	点值精度 最小值	点值精度 平均值
2015	33.7	2.9	12.3
2018	29.4	2.7	9.3
2019	25.9	2.4	8.8
2020	21.8	3.1	8.9

3.2 震前重力变化特征

尽管 2018 年以前青藏高原地区流动重力观测网非常稀疏,但利用依托陆态网络工程建立的格尔木—五道梁和玉树—玛多两条测线,以及东部的区域流动重力测网,我们提取了本次地震周边地区 2015 年以来的流动重力变化。

(1) 2015 年以来的累积重力变化

以 2015 年度观测结果为基准,将 2018、2019、

2020 年观测结果与之作差,计算获得 3~5 年的累积重力变化。图 6(a、b、c)分别展示了 2015 年以来玛多 $M_s7.0$ 地震前 3、4、5 年的累积重力变化特征,显示本次地震周边地区存在较显著的重力变化,地震发生在重力正-负变化的高梯度带。

2015—2018 年(图 6a)的 3 年累积重力变化显示,玛多震区及周边重力场变化呈西北负-东南正的特征,震中东南局部正重力变化量级超过 $75 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,正负重力变化差异超过 $100 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2015—2019 年(图 6b)的 4 年累积重力变化显示,玛多震区及周边重力场变化继续维持了西北负-东南正的态势,重力场变化等值线在震中南部平行于断裂带走向,至东部转向为垂直,震中东南局部正重力变化量级稍减,但依然达 $60 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,正负重力变化差异超过 $90 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2015—2020 年(图 6c)的 5 年累积重力变化显示,区域重力场总体上自西向东呈正-负-正-负的变化趋势,玛多震区及周边重力场呈西负-东正变化特征,重力变化梯度带走向垂直于断裂带,震中东部的

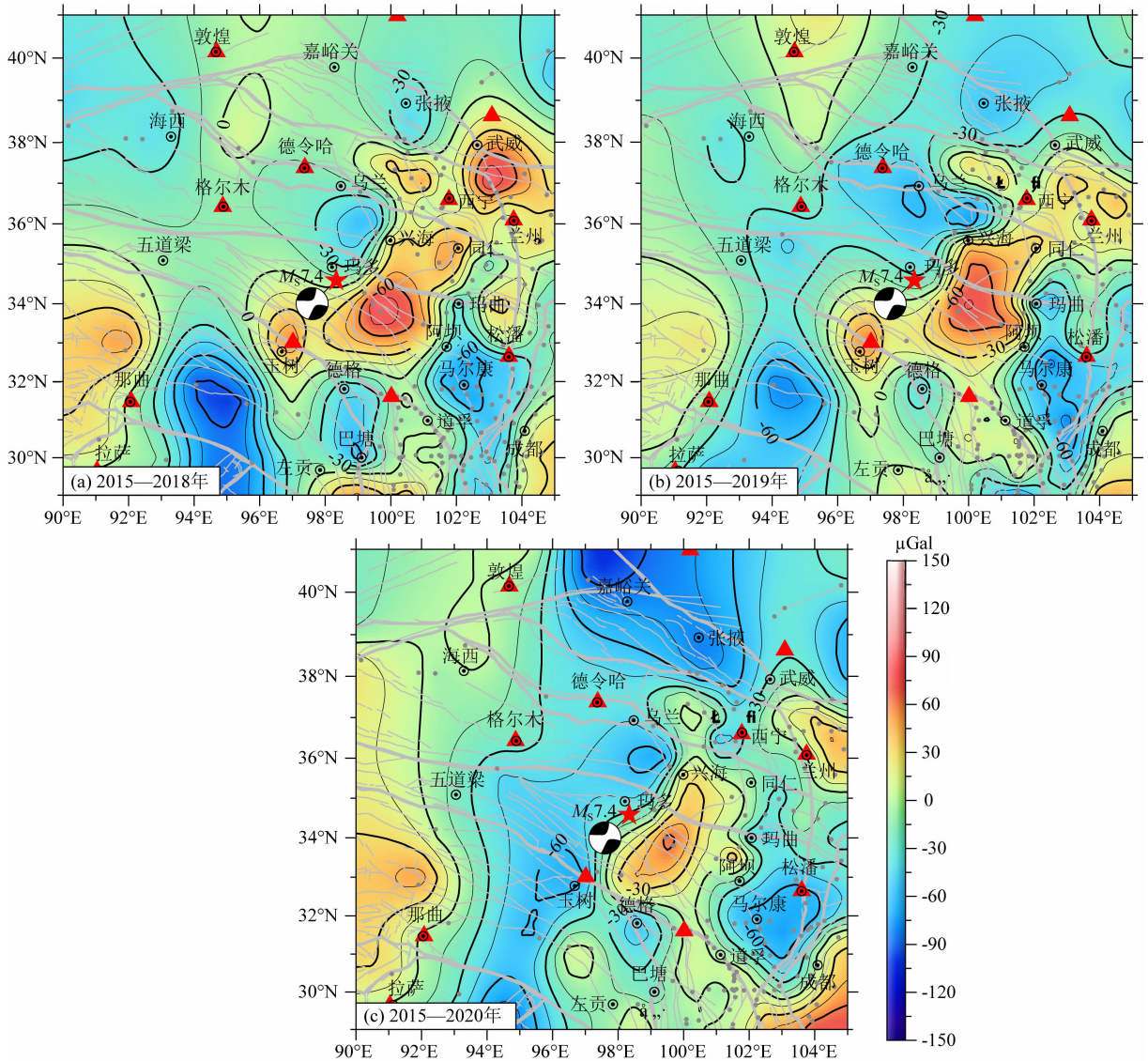


图6 2015年以来累积重力变化

(a) 2015—2018年累积重力变化；(b) 2015—2019年累积重力变化；(c) 2015—2020年累积重力变化($1 \mu\text{Gal}=1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

Fig. 6 Cumulative gravity change since 2015

(a) Cumulative gravity change during 2015—2018, (b) cumulative gravity change during 2015—2019, and (c) cumulative gravity change during 2015—2020 ($1 \mu\text{Gal}=1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

局部正重力变化显著,但较图 6(a,b)范围收窄、量级减小,局部超过 $45 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,正负重力变化差异超过 $110 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

从累积重力变化看,至少自 2018 年以来震中周边区域即出现较明显重力变化,震中以西(玉树—玛多测线以西)由于无观测点,重力变化细节不明;震中以东则有较明显的正变化。2019 年以来,震中以东正重力变化范围逐步收窄、量级逐步减小,至 2020 年形成了与断裂带走向垂直的重力变化梯度带。

(2)2018 年以来的重力变化

2018 年以来,玉树—玛多测线至格尔木—五道

梁测线之间增加了少量测点,从图 7(a,b,c)看,震前近两年震中及周边主要呈区域性重力变化,整体幅度较小,震中位于重力变化零值线。

2018—2019 年(图 7a)的 1 年期重力变化显示,地震周边地区总体呈西北正-东南负的微弱重力变化,震中东南局部负重力变化约 $-15 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

2019—2020 年(图 7a)的 1 年期重力变化显示,地震周边地区总重力变化微弱,震中附近有局部弱变化,存在重力变化零值线局部变化。

2018—2020 年(图 7a)的 2 年累积重力变化显示,地震周边重力变化呈西南正-东北负的区域弱变化,大致与 2015 年以来的较长期累积重力变化趋势

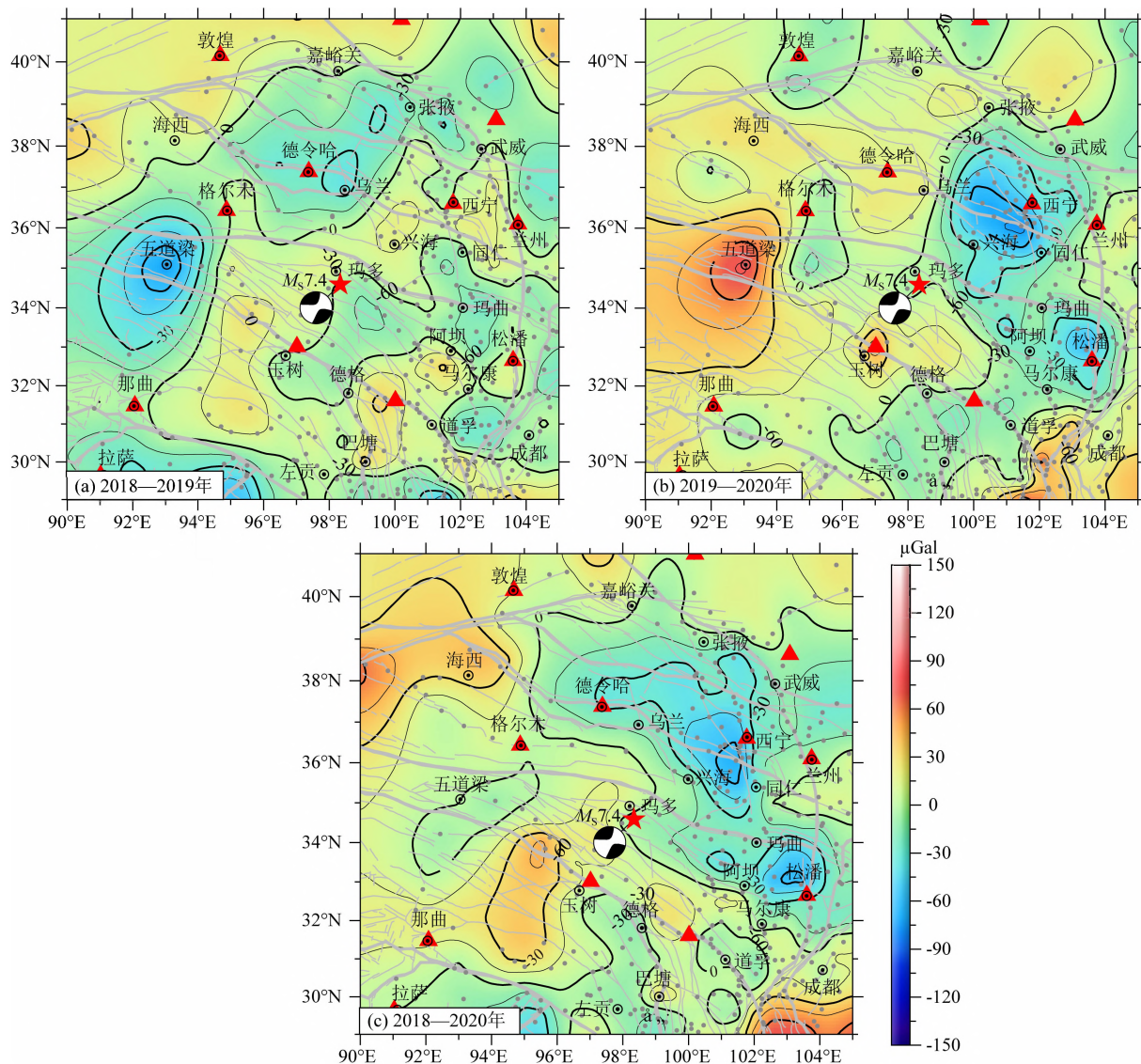


图7 2018年以来重力变化

(a) 2018—2019年重力变化；(b) 2019—2020年重力变化；(c) 2018—2020年重力变化($1 \mu\text{Gal}=1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 7 Gravity changes since 2018

(a) Gravity changes during 2018—2019; (b) Gravity changes during 2019—2020,

and (c) gravity changes during 2018—2020 ($1 \mu\text{Gal}=1 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

相反,震中周边地区重力变化依然不大,在 $\pm 15 \times 10^{-8} \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以内。

从近两年的年际和2年累积重力变化看,2018年以来,玛多地震周边地区重力变化很小,显示震区地壳在震前两年已进入“固化”状态,活动性减弱,但内部应力持续增强。

4 讨论

4.1 T_c 与大地构造

研究区域 T_c 值为 $0 \sim 100 \text{km}$,与活动块体构造关系密切。

祁连地块体岩石圈强度较低($0 \text{km} < T_c < 30 \text{km}$),易于发生形变,是青藏高原与刚性的阿拉善块体汇聚的前缘地带,自第四纪以来发生强烈隆升,内部发育多条活动断裂,地壳形变剧烈,地震活跃(刘小凤等,2005)。

柴达木块体 T_c 值较高,特别是柴达木盆地格尔木至海西等地区达 $50 \sim 80 \text{km}$,与李永东等(2013)给出的 $50 \sim 90 \text{km}$,Jordan和Watts(2005)给出的 $50 \sim 60 \text{km}$,Braitenberg等(2003)给出的 $60 \sim 80 \text{km}$ 一致。柴达木盆地的高 T_c 值与其为古老克拉通碎片、下伏有古生代地壳这一构造背景相符(Jordan and Watts, 2005; 李永东等,2013)。

巴颜喀拉块体是青藏高原物质东向运动的主要区域, T_e 值为 $0 \sim 20$ km, 岩石圈强度弱. 自五道梁以东, T_e 由 20 km 逐步减小至龙门山次级块体的 10 km 以下. 较弱的岩石圈强度也使得在南北“夹持”下的巴颜喀拉块体更易于东向挤出, 并在受刚性的四川盆地阻挡后造成地壳变形、缩短、增厚, 以及形成逆冲推覆构造等. 巴颜喀拉块体东部中下地壳出现低速层结构 (Wang et al., 2010; 嘉世旭等, 2014), 同时具有高导/低阻的大地电磁特性 (王绪本等, 2009; 詹艳等, 2021), 表明该区域存在低强度的地壳软弱层. 同时, 广泛分布的断裂带也会降低岩石圈整体强度, 因此巴颜喀拉块体东部特别是龙门山次级块体 T_e 表现为显著低值 (< 10 km).

羌塘块体大部分区域的 T_e 大于 20 km, 五道梁以南出现局部大于 30 km 的高值区, 玉树—德格地区出现局部大于 40 km 的高值区. 这些局部高值区内部构造相对稳定, $M_s5.0$ 以上地震主要围绕高值区边界区域发生.

综上所述, 研究区域岩石圈有效弹性厚度横向变化明显, 块体之间岩石圈强度差异较大, 块体内部也可能存在局部的高强度岩石圈. T_e 较小的区域往往是易于发生地壳形变的边界带区域, 块体边界多为岩石圈强度变化梯度带. 青藏高原东北部这种高 T_e 区域被低 T_e 区域分割的分布形态在印度半岛和澳大利亚均有发现 (Jordan and Watts, 2005; Simons et al., 2000). T_e 反映的这种高原内部岩石圈强度横向差异说明在青藏高原形成过程中, 板块碰撞对大陆块体的改造作用不是均一的, 岩石圈强度大的块体不易被构造运动所改造, 而可能被继承保留下来, 形成高原内局部构造稳定的高 T_e 区域.

4.2 T_e 与强震活动

岩石圈有效弹性厚度虽与地球各圈层厚度无直接对应关系, 但其作为表征岩石圈整体力学强度的参数, 与壳幔物质组成、热状态等相关 (Forsyth, 1985; Burov and Diament, 1995; 安美建和石耀霖, 2006). T_e 计算结果也可以为高原内部构造运动机制等研究提供参考依据 (赵俐红等, 2004; 姜效典等, 2014).

从地震分布看, 研究区域强震活动主要发生在 T_e 强弱变化的过渡地带, 以及 T_e 较小区域的断裂带上. 柴达木盆地、羌塘块体内部玉树—德格等局部 T_e 高值区代表了高原内部的局部构造稳定区域, 这些区域内部相对少发 $M_s5.0$ 以上中强地震, 更无 $M_s7.0$ 以上大地震. 巴颜喀拉块体东部、川滇菱形

块体北部, 岩石圈强度很小 (一般 $T_e < 10$ km), 反映这些区域岩石圈易于发生构造形变, 其地震活动虽不如活动块体边界带频繁, 但震级较高原内局部高 T_e 值区域大, 例如巴颜喀拉块体东部块体内部就发生过 1947 年达日 $M_s7.7$ 地震.

本次玛多 $M_s7.4$ 地震发生在巴颜喀拉块体内部, 震中 T_e 较小 (~ 15 km), 其北部 T_e 逐渐增大, 也属于岩石圈强度由弱向强的过渡地带. 发震断层两侧没有发现明显的 T_e 变化, 同时挠曲均衡重力异常幅度小 ($< 20 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), 变化平缓, 显示在垂向上震中区域处于整体均衡状态, 断层的运动应以水平方向的错动为主, 这与本次玛多地震以走滑为主的震源机制解一致.

4.3 玛多 $M_s7.4$ 地震前重力变化机理

地震实际上是在区域构造应力作用下, 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 (张培震等, 2013). 地震的孕育发生过程中必然伴随地球内外的形变、物质迁移等, 引起地表重力场的变化. 高精度的流动重力复测可以捕捉到大震前重力场有序性变化, 并应用于大震地点的预测 (祝意青等, 2020).

数十年来, 学者们根据大地震前后重力变化特征, 对震前重力变化机理开展了探索. 陈运泰等 (1980) 在分析 1975 年海城地震和 1976 年唐山地震前后重力变化时指出地表观测到的重力变化大部份是质量迁移引起的, 并对形变和质量迁移引起的重力变化效应进行了理论上的分析. Li 和 Fu (1983) 采用扩容模式来解释唐山地震前后重力场的变化过程. 认为唐山地震震中经历了应力积累压缩 (重力增大) - 膨胀扩容 (重力减小) - 发震 - 震后恢复的过程, 并且理论计算的重力变化值与实测值具有较好的一致性. 申重阳等 (2011) 根据对 2009 年云南姚安 $M_s6.0$ 地震震前重力场变化特征的分析, 结合震源机制解, 指出: 震中区相对重力变化四象限分布图像反映出孕震体先存剪应力, 并提出了“闭锁剪力”前兆模式, 也为震前出现的“梯度带”和“四象限”前兆标志解释提供了一种思路. 虽然目前尚未有一种成熟的理论模式能够解释所有观测到震前重力变化现象, 但是无论其背后的物理过程为何, 地表观测到的重力场变化均可归结为观测点位置变化 (地壳形变) 和物质迁移 (局部密度变化、地下流体运动等) 的综合影响 (李瑞浩, 1990).

观测点随地表垂直运动 1 mm 引起的重力变化约为 $0.3086 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 隆升引起负变化, 沉降

引起正变化。GNSS 和水准测量表明青藏高原处于整体隆升过程中,且其东缘和喜马拉雅山相对于山前盆地隆升速率 $\sim 6 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,而高原内部一般隆升速率 $1\sim 2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,局部张裂构造区还存在 $0\sim 3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的沉降(Liang et al., 2013; Hao et al., 2014)。尽管大震前可能有较短期的强烈地表垂直运动(张四新等, 2008),但总体上川西高原垂直运动速率约为 $\pm 10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (高原内部较边缘小得多),其重力变化影响量级应小于 $4 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}/\text{a}$ 。因此,地表垂直运动不能完全解释观测到的玛多地震前累积重力变化(图 6),它主要还是来源于地球内部构造运动相关物质迁移的影响。

玛多地震前重力场存在明显的有序性变化,3~5 年的累积重力变化自西向东存在大范围的负-正-负变化趋势(图 6),2018 年以来的近期重力变化主要呈西正-东负区域性弱变化,重力变化方向与长期累积变化相反,震中位于重力变化零值线拐弯部位(图 7)。负-正-负的累积重力变化态势显示高原物质向东运动过程中,震中以西因物质迁出而呈负重力变化,在震中以东、玛曲—阿坝以西地区堆积而呈正重力变化,玛曲—阿坝以东区域则因物质补充不足而呈负重力变化,显示了震前的构造运动态势。近期的弱重力变化则意味着块体物质迁移达到了新的平衡状态,而震中及周边地区岩石圈则已积累了巨大应力,地震危险性增强。

5 结论

本文利用 EIGEN6C4 重力场模型和 SIO V15.1 地形数据,基于岩石圈挠曲均衡理论,计算了岩石圈有效弹性厚度和挠曲均衡重力异常,研究了玛多 $M_s 7.4$ 地震周边地区重力均衡背景,探讨了区域大地构造特征;基于流动重力观测资料,分析了震前重力变化特征,研究了其可能的重力变化机理。本文的研究可得到如下结论:

(1)玛多 $M_s 7.4$ 地震及周边地区(青藏高原东北部)岩石圈有效弹性厚度为 $0\sim 100 \text{ km}$,且各活动块体间差异较大。自北往南,祁连块体岩石圈强度较弱,有效弹性厚度为 $0\sim 30 \text{ km}$;柴达木块体为 $50\sim 80 \text{ km}$ 高值;巴颜喀拉块体为 $0\sim 20 \text{ km}$ 低值;羌塘块体大部分区域 T_e 大于 20 km ,且存在玉树—德格等局部大于 40 km 的高值区。

(2)岩石圈有效弹性厚度分布与区域块体构造关系密切,青藏高原东北部块体间 T_e 差异明显。 T_e

反映的这种高原内部岩石圈强度横向差异说明在青藏高原形成过程中,板块碰撞对大陆块体的改造作用不是均一的,岩石圈强度大的块体不易被构造运动所改造,而可能被继承保留下来,形成高原内局部构造相对稳定的高 T_e 块体或区域。巴颜喀拉块体 T_e 较其北部柴达木块体和南部羌塘块体均小,易于在南北“夹持”下块体物质的东向运动。

(3)区域强震活动主要发生在 T_e 强弱变化的过渡地带,以及 T_e 较小地区的断裂带上。块体及其内部的局部 T_e 高值区是构造相对稳定的区域,这些区域内部相对少发 $M_s 5.0$ 以上中强地震。岩石圈强度很小的地区(一般 $T_e < 10 \text{ km}$)易于发生构造形变,其地震活动虽不如活动块体边界带频繁,但震级较局部高 T_e 值区域大。

(4)玛多 $M_s 7.4$ 地震前观测到了较长时间尺度的累积重力变化,自 2015 年以来 3~5 年的累积正负重力变化差异均达 $\sim 100 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,自西向东呈大范围的负-正-负变化趋势,但 2018 年以来震中及周边地区则以区域性弱变化为主,地震发生在重力变化“零值线”拐弯部位。震前重力变化主要反映的是地球内部构造运动相关物质迁移过程,同时也再次说明 $M_s 7.0$ 以上地震重力变化分析应关注长期变化特征,短期的弱变化可能意味着震区地壳已进入“固化”状态,内部应力持续增强。

References

- An M J, Shi Y L. 2006. Review on lithospheric thickness research of the Chinese continent. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 13(3): 23-30.
- Braitenberg C, Wang Y, Fang J, et al. 2003. Spatial variations of flexure parameters over the Tibet-Quinghai plateau. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 205(3-4): 211-224.
- Burov E B, Diament M. 1995. The effective elastic thickness (T_e) of continental lithosphere: what does it really mean. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 100(B3): 3905-3927.
- Chen B. 2013. The effective elastic thickness over China and surroundings and its lithosphere dynamic implication [Ph. D. thesis] (in Chinese). Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan).
- Chen C Y, Ren J W, Meng G J, et al. 2013. Division, deformation and tectonic implication of active blocks in the eastern segment of Bayan Har block. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(12): 4125-4141, doi: 10.6038/cjg20131217.
- Chen S, Wang Q S, Zhu Y Q, et al. 2011. Temporal and spatial features of isostasy anomaly using gravitational admittance model at eastern margin of Tibetan Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in

- Chinese), 54(1): 22-34, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.004.
- Chen Y T, Gu H D, Lu Z X. 1980. Variations of gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975 and the Tangshan earthquake, 1976. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2(1): 21-31.
- Forsyth D W. 1985. Subsurface loading and estimates of the flexural rigidity of continental lithosphere. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 90(B14): 12623-12632.
- Fu G Y, Gao S H, Zhang G Q, et al. 2015. Gravitational isostasy background and surface deformation response characteristics of the 2015 Nepal $M_s8.1$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(6): 1900-1908, doi: 10.6038/cjg20150606.
- Fu G Y, Wang Z Y. 2020. Crustal structure, isostatic anomaly and flexure mechanism around the Jinghe $M_s6.6$ earthquake in Xinjiang. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(6): 2221-2229, doi: 10.6038/cjg2020N0076.
- Gan W J, Zhang P Z, Shen Z K, et al. 2007. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 112(B8): B08416, doi: 10.1029/2005JB004120.
- Hao M, Wang Q L, Shen Z K, et al. 2014. Present day crustal vertical movement inferred from precise leveling data in eastern margin of Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 632: 281-292.
- Hu M Z, Hao H T, Li H, et al. 2019. Quantitative analysis of gravity changes for earthquake prediction. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 35(3): 417-430.
- Hu M Z, Jin T Y, Hao H T, et al. 2020. Lithospheric effective elastic thickness and its tectonics in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 63(3): 969-987, doi: 10.6038/cjg2020N0225.
- Jia M Y, Zhan J H. 2000. THE structure and ability of the China seismological gravity monitoring system. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 22(4): 360-367.
- Jia S X, Liu B J, Xu Z F, et al. 2013. The crustal structures of the central Longmenshan along and its margins as related to the seismotectonics of the 2008 Wenchuan earthquake. *Science China Earth Sciences*, 57(4): 777-790, doi: 10.1007/s11430-013-4744-9.
- Jiang X D, Li D Y, Gong W, et al. 2014. Differential deformation and uplift mechanisms of the eastern and western Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(12): 4016-4028, doi: 10.6038/cjg20141214.
- Jordan T A, Watts A B. 2005. Gravity anomalies, flexure and the elastic thickness structure of the India-Eurasia collisional system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 236(3-4): 732-750.
- Kirby J F. 2014. Estimation of the effective elastic thickness of the lithosphere using inverse spectral methods; the state of the art. *Tectonophysics*, 631: 87-116.
- Li CX. 2009. The long-term faulting behavior of the eastern segment (Maqin-Maqu) of the East Kunlun fault since the Late Quaternary [Ph.D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator.
- Li R H, Fu Z Z. 1983. Local gravity variations before and after the Tangshan earthquake ($M=7.8$) and the dilatation process. *Tectonophysics*, 97(1-4): 159-169.
- Li R H. 1990. A new stage and new tasks of gravimetry. *Earthquake* (in Chinese), (6): 7-18, 75.
- Li Y D, Zheng Y, Xiong X, et al. 2013. Lithospheric effective elastic thickness and its anisotropy in the northeast Qinghai-Tibet plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 56(4): 1132-1145, doi: 10.6038/cjg20130409.
- Liang M J, Zhou R J, Yan L, et al. 2014. The relationships between neotectonic activity of the middle segment of Dari fault and its geomorphological response, Qinghai province, China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 36(1): 28-38.
- Liang M J, Yang Y, Du F, et al. 2020. Late quaternary activity of the central segment of the Dari fault and restudy of the surface rupture zone of the 1947 $M7\frac{3}{4}$ dariearthquake, Qinghai province. *Seismology and Geology* (in Chinese), 42(3): 703-714.
- Liang S M, Gan W J, Shen C Z, et al. 2013. Three-dimensional velocity field of present-day crustal motion of the Tibetan Plateau derived from GPS measurements. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 118(10): 5722-5732.
- Liu X F, Xiao L Z, Mei X P, et al. 2005. Characteristics of seismicity and sequence patterns in Qilianshan seismic belt. *Northwestern Seismological Journal* (in Chinese), 27(1): 56-60.
- McNutt M. 1979. Compensation of oceanic topography: An application of the response function technique to the Surveyor area. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 84(B13): 7589-7598.
- Ren J J, Xu X W, Yeats R S, et al. 2013. Latest quaternary paleoseismology and slip rates of the Longriba fault zone, eastern Tibet: Implications for fault behavior and strain partitioning. *Tectonics*, 32(2): 216-238.
- Shen C Y, Li H, Sun S A, et al. 2009. Dynamic variations of gravity and the preparation process of the Wenchuan 8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(10): 2547-2557, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.013.
- Shen C Y, Tan H B, Hao H T, et al. 2011. Mechanism of precursory gravity change before Yao'an $M_s6.0$ earthquake in 2009. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 31(2): 17-22, 47.
- Simons F J, Zuber M T, Korenaga J. 2000. Isostatic response of the Australian lithosphere: estimation of effective elastic thickness and anisotropy using multi-taper spectral analysis. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 105(B8): 19163-19184.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- Van Der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. 2000. Uniform slip-rate along the Kunlun fault: Implications for seismic behavior and large-scale tectonics. *Geophysical Research Letters*, 27(16): 2353-2356.
- Van Der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. 2002. Uniform postglacial slip-rate along the central 600km of the Kunlun fault

- (Tibet), from ^{26}Al , ^{10}Be , and ^{14}C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology. *Geophys. J. Int.*, 148(3): 356-388.
- Van Wees J D, Cloetingh S. 1994. A finite-difference technique to incorporate spatial variations in rigidity and planar faults into 3-D models for lithospheric flexure. *Geophys. J. Int.*, 117(1): 179-195.
- Wang C Y, Lou H, Silver P G, et al. 2010. Crustal structure variation along 30°N in the eastern Tibetan Plateau and its tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 289(3-4): 367-376.
- Wang Q, Zhang P Z, Freymueller J T, et al. 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294(5542): 574-577.
- Wang Q S, Teng J W, Zhang Y Q, et al. 2008. The effect of crustal gravity isostasy and Wenchuan earthquake in Longmenshan faults and adjacent area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 23(6): 1664-1670.
- Wang W L, Fang L H, Wu J P, et al. 2021. Aftershock sequence relocation of the 2021 $M_s7.4$ Maduo earthquake, Qinghai, China. *Science China Earth Sciences*, 51(7): 1193-1202, doi: 10.1360/SSTe-2021-0149.
- Wang X B, Zhu Y T, Zhao X K, et al. 2009. Deep conductivity characteristics of the Longmenshan, Eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 564-571.
- Watts A B. 2001. Isostasy and flexure of the lithosphere. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wen X Z, Xu X W, Zheng R Z, et al. 2003. Average slip-rate and recent large earthquake ruptures along the Garzê-Yushu fault. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 276-288.
- Wen X Z, Du F, Zhang P Z, et al. 2011. Correlation of major earthquake sequences on the northern and eastern boundaries of the Bayan Har block, and its relation to the 2008 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(3): 706-716, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.010.
- Xu X W, Wen X Z, Chen G H, et al. 2008. Discovery of the Longriba fault zone in eastern Bayan Har block, China and its tectonic implication. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(9): 1209-1223.
- Xu X W, Chen G H, Wang Q X, et al. 2017. Discussion on seismogenic structure of Jiuzhaigou earthquake and its implication for current strain state in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(10): 4018-4026, doi: 10.6038/cjg20171028.
- Zhan Y, Liang M J, Sun X Y, et al. 2021. Deep structure and seismogenic pattern of the 2021. 5. 22 Maduo (Qinghai) $M_s7.4$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 64(7): 2232-2252, doi: 10.6038/cjg202100521.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(2): 13-24.
- Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. 2004. Continuous deformation of the Tibetan plateau from global positioning system data. *Geology*, 32(9): 809-812.
- Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. 2008. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(4): 1066-1073.
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. 2013. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China. *Scientia Sinica Terrae* (in Chinese), 43(10): 1607-1620.
- Zhang S X, Zhang X, Wang S X, et al. 2008. Analysis of crustal vertical deformation before and after Wenchuan $M_s8.0$ earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 28(6): 43-46, 52.
- Zhang Y Q, Wang Q S, Teng J W. 2010. The crustal isostatic anomaly beneath eastern Tibet and western Sichuan and its relationship with the distribution of earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(11): 2631-2638, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.011.
- Zhao L H, Jiang X D, Jin Y, et al. 2004. Effective elastic thickness of continental lithosphere in Western China. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 29(2): 183-190.
- Zheng Y, Li Y D, Xiong X. 2012. Effective lithospheric thickness and its anisotropy in the North China Craton. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(11): 3576-3590, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.007.
- Zhu Y Q, Liu F, Li T M, et al. 2015. Dynamic variation of the gravity field in the Sichuan-Yunnan region and its implication for seismic risk. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(11): 4187-4196, doi: 10.6038/cjg20151125.
- Zhu Y Q, Shen C Y, Zhang G Q, et al. 2018. Rethinking the development of earthquake monitoring and prediction in Mobile Gravity. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 38(5): 441-446.
- Zhu Y Q, Zhang Y, Zhang G Q, et al. 2020. Gravity variations preceding the large earthquakes in the Qinghai-Tibet Plateau from 21st century. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 65(7): 622-632.

附中文参考文献

- 安美建, 石耀霖. 2006. 中国大陆岩石圈厚度分布研究. *地学前缘*, 13(3): 23-30.
- 陈波. 2013. 中国及邻区岩石圈有效弹性厚度及其动力学意义[博士学位论文]. 武汉: 中国地质大学.
- 陈长云, 任金卫, 孟国杰等. 2013. 巴颜喀拉块体东部活动块体的划分、形变特征及构造意义. *地球物理学报*, 56(12): 4125-4141, doi: 10.6038/cjg20131217.
- 陈石, 王谦身, 祝意青等. 2011. 青藏高原东缘重力导纳模型均衡异常时空特征. *地球物理学报*, 54(1): 22-34, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.01.004.
- 陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋. 1980. 1975年海城地震与1976年唐山地震

- 震前后的重力变化. 地震学报, 2(1): 21-31.
- 付广裕, 高尚华, 张国庆等. 2015. 2015年尼泊尔 $M_s8.1$ 地震的地壳重力均衡背景与地表形变响应特征. 地球物理学报, 58(6): 1900-1908, doi: 10.6038/cjg20150606.
- 付广裕, 王振宇. 2020. 新疆精河 6.6 级地震周边地区密度构造、均衡异常以及岩石圈挠曲机理. 地球物理学报, 63(6): 2221-2229, doi: 10.6038/cjg2020N0076.
- 胡敏章, 郝洪涛, 李辉等. 2019. 地震分析预报的重力变化异常指标分析. 中国地震, 35(3): 417-430.
- 胡敏章, 金涛勇, 郝洪涛等. 2020. 青藏高原东南缘岩石圈有效弹性厚度及其构造意义. 地球物理学报, 63(3): 969-987, doi: 10.6038/cjg2020N0225.
- 贾民育, 詹洁晖. 2000. 中国地震重力监测体系的结构与能力. 地震学报, 22(4): 360-367.
- 嘉世旭, 刘保金, 徐朝繁等. 2014. 龙门山中段及两侧地壳结构与汶川地震构造. 中国科学: 地球科学, 44(3): 497-509.
- 姜效典, 李德勇, 宫伟等. 2014. 青藏高原东西向差异形变与隆升机制. 地球物理学报, 57(12): 4016-4028, doi: 10.6038/cjg20141214.
- 李陈侠. 2009. 东昆仑断裂带东段(玛沁-玛曲)晚第四纪长期滑动习性研究[博士论文]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 李瑞浩. 1990. 重力学的新阶段和新任务. 地震, (6): 7-18, 75.
- 李永东, 郑勇, 熊熊等. 2013. 青藏高原东北部岩石圈有效弹性厚度及其各向异性. 地球物理学报, 56(4): 1132-1145, doi: 10.6038/cjg20130409.
- 梁明剑, 周荣军, 闫亮等. 2014. 青海达日断裂中段构造活动与地貌发育的响应关系探讨. 地震地质, 36(1): 28-38.
- 梁明剑, 杨耀, 杜方等. 2020. 青海达日断裂中段晚第四纪活动性与 1947 年 $M7\frac{3}{4}$ 地震地表破裂带再研究. 地震地质, 42(3): 703-714.
- 刘小凤, 肖丽珠, 梅秀萍等. 2005. 祁连山地震带地震活动特征及序列类型. 西北地震学报, 27(1): 56-60.
- 申重阳, 李辉, 孙少安等. 2009. 重力场动态变化与汶川 $M_s8.0$ 地震孕育过程. 地球物理学报, 52(10): 2547-2557, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.013.
- 申重阳, 谈洪波, 郝洪涛等. 2011. 2009年姚安 $M_s6.0$ 地震重力场前兆变化机理. 大地测量与地球动力学, 31(2): 17-22, 47.
- 王谦身, 滕吉文, 张永谦等. 2008. 龙门山断裂系及邻区地壳重力均衡效应与汶川地震. 地球物理学进展, 23(6): 1664-1670.
- 王未来, 房立华, 吴建平. 2021. 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震序列精定位研究. 中国科学·地球科学, 51(7): 1193-1202, doi: 10.1360/SSTe-2021-0149.
- 王绪本, 朱迎堂, 赵锡奎等. 2009. 青藏高原东缘龙门山逆冲构造深部电性结构特征. 地球物理学报, 52(2): 564-571.
- 闻学泽, 徐锡伟, 郑荣章等. 2003. 甘孜-玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂. 中国科学(D辑), 33(S1): 199-208.
- 闻学泽, 杜方, 张培震等. 2011. 巴颜喀拉地块北和东边界大地震序列的关联性 with 2008年汶川地震. 地球物理学报, 54(3): 706-716, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.03.010.
- 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华等. 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(5): 529-542.
- 徐锡伟, 陈桂华, 王启欣等. 2017. 九寨沟地震发震断层属性及青藏高原东南缘现今应变状态讨论. 地球物理学报, 60(10): 4018-4026, doi: 10.6038/cjg20171028.
- 詹艳, 梁明剑, 孙翔宇等. 2021. 2021年5月22日青海玛多 $M_s7.4$ 地震深部环境及发震构造模式. 地球物理学报, 64(7): 2232-2252, doi: 10.6038/cjg2021O0521.
- 张培震, 邓起东, 张国民等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D辑), 33(增刊): 12-20.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008. 2008年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 51(4): 1066-1073.
- 张培震, 邓起东, 张竹琪等. 2013. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1607-1620.
- 张四新, 张希, 王双绪等. 2008. 汶川 8.0 级地震前后地壳垂直形变分析. 大地测量与地球动力学, 28(6): 43-46, 52.
- 张永谦, 王谦身, 滕吉文. 2010. 川西藏东地区的地壳均衡异常及其与地震分布的关系. 地球物理学报, 53(11): 2631-2638, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.11.011.
- 赵俐红, 姜效典, 金煜等. 2004. 中国西部大陆岩石圈的有效弹性厚度研究. 地球科学-中国地质大学学报, 29(2): 183-190.
- 郑勇, 李永东, 熊熊. 2012. 华北克拉通岩石圈有效弹性厚度及其各向异性. 地球物理学报, 55(11): 3576-3590, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.007.
- 祝意青, 刘芳, 李铁明等. 2015. 川滇地区重力场动态变化及其强震危险含义. 地球物理学报, 58(11): 4187-4196, doi: 10.6038/cjg20151125.
- 祝意青, 申重阳, 张国庆等. 2018. 我国流动重力监测预报发展之再思考. 大地测量与地球动力学, 38(5): 441-446.
- 祝意青, 张勇, 张国庆等. 2020. 21世纪以来青藏高原大地震前重力变化. 科学通报, 65(7): 622-632.

(本文编辑 胡素芳)