

郑秋月, 黄江培, 吴宇琴, 等. 2025. 2021年漾濞 M_s 6.4地震前重力段差指标量分析及场源特征反演[J]. 地震研究, 48(1): 022-031, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0003.

Zheng Q Y, Huang J P, Wu Y Q, et al. 2025. Analysis of the gravity variation index before the Yangbi M_s 6.4 earthquake and inversion of the field source characteristics[J]. Journal of Seismological Research, 48(1): 022-031, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0003.

2021年漾濞 M_s 6.4地震前重力段差指标量分析及场源特征反演*

郑秋月, 黄江培, 吴宇琴, 陈政宇, 刘东, 王青华*

(云南省地震局, 云南昆明 650224)

摘要: 基于2016—2021年云南地区流动重力重复观测资料, 利用流动重力段差变化可视化方法及重力场变化显著性程度指标量 G 和 C 值研究了2021年漾濞 M_s 6.4地震前的重力变化, 并反演了其于地震孕育相关的场源分布特征, 开展了对研究区重力变化及场源特征的定性和定量研究。结果表明: ①段差表示法的大小和方向对地下物质的运移方向有一定的指示意义, 震前重力指标量呈显著上升, 震后又迅速回落, 重力变化指标量 G 和 C 值可作为评价测网区域重力变化显著性程度的定量依据; ②反演得到的重力变化场源位置主要集中在红河断裂带北段至滇西北一带, 且表现出与维西—乔后断裂及红河断裂带走向较为一致的分布特征, 这可能与地震前中上地壳的深部物质运移相关。

关键词: 重力段差; 定量分析; 重力变化指数; 场源反演; 漾濞 M_s 6.4地震

中图分类号: P315.726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)01-0022-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0003

0 引言

2021年云南漾濞 M_s 6.4地震是云南地区继2014年鲁甸 6.5级地震及景谷 6.6级地震后发生的又一次强震。此次地震发生在川滇菱形块体西南边界的维西—乔后断裂附近, 该区域位于青藏高原东南部横断山脉的三江地区, 也是川滇菱形块体西边界金沙江—红河断裂带的北段区域, 该区域地质活动相对活跃, 1996年曾发生过丽江

7.0级地震。研究认为漾濞 M_s 6.4地震的发生是青藏高原东缘物质持续南向挤出的结果(王光明等, 2021; 龙锋等, 2021), 结合陆地时变重力数据分析还发现震中处于重力变化的高梯度带区域, 且在震中附近重力场变化呈四象限特征分布特征(刘东等, 2021; 黄江培等, 2022)。

时变重力场反映物质迁移的基本物理场, 直接反映地球内部构造运动和地表质量迁移过程。地震孕育过程中的地壳变形和震源区介质性质变化会引起震区周围重力场的变化。学者们结合历

* 收稿日期: 2023-12-11.

基金项目: 中国地震局震情跟踪项目(2024010201); 云南省地震局创新团队(CXTD202410); 云南省地震局科技专项(2024X03、2024X04); 地震科技星火计划(XH24027YC).

第一作者简介: 郑秋月(1992-), 工程师, 主要从事流动重力数据处理及反演工作. E-mail: zhengqymoon@163.com.

通信作者简介: 王青华(1977-), 高级工程师, 主要从事流动重力数据处理研究. E-mail: 37185071@qq.com.

史震例研究发现大震前后重力场呈现出区域性持续变化,在震前一段时间内,可能因为膨胀现象而引起重力的变化,震后会出现质量重分布,这些深部场源物质密度的不均衡变化与地震孕育过程密切相关 (Chen *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2023; 赵云峰等, 2023)。地表定点重复观测获取的流动重力数据能较好地捕捉到震间过程中与深部地壳介质属性变化相关的前兆信息。区域流动重力场观测对划分强震危险区,以及未来强震的中、长期预测,尤其是在发震地点的判定具有优势 (胡敏章等, 2019; 祝意青等, 2020, 2022; 文翔等, 2022)。因此,通过定期对地表固定点进行流动重力重复观测,获得高精度微重力变化信号,就可能捕捉到与震源变化有关的重力前兆信息 (Xing *et al.*, 2021),这对于认识孕震区和断裂带周边的构造活动意义重大。

以往分析陆地重力场时变信号时,研究人员大多采用平差软件获取点值变化,通过插值得到不同时空尺度的重力场变化特征。而实际由于地表重力观测受多种因素影响,且测点为非均匀离散分布,因此进行插值后往往会引入一些虚假信号,尤其对于变化量级较小的地震重力变化,其信噪比较低。等值线表示方法也不能在对重力场变化作可视化的同时叠加测点的误差信息。因此,以往研究人员采用点值变化进行分析,本文基于一种新的可视化方法,并结合重力段差变化指标量 G 值和 C 值对漾濞 $M_s6.4$ 地震前后的区域重力场变化进行定量分析。该方法采用段差进行可视化分析,段差是野外流动重力测量中获取的直接观测量,更能突出发生变化测点位置、误差及其显著性程度,为研究与地震孕育发生过程有关的重力场变化提供可靠的技术保证 (李晓一等, 2017; 王同庆等, 2018; 李静等, 2023)。在此基础上,基于 2016—2021 年云南地区流动重力重复观测资料,并利用优化的欧拉反褶积方法实现了在先验信息较少的情况下研究区场源特征的等效源反演及解释,开展研究地区重力变化及场源特征的定性和定量研究,为研究地震孕育

过程的介质变化与构造运动等问题提供技术参考。

1 研究区概况

漾濞 $M_s6.4$ 地震发生在青藏高原东南缘川滇菱形块体的西边界带 (图 1a),该边界带北接构造活动较强烈且挤压明显的金沙江断裂;中部为具有强烈构造拉张特征的滇西北断陷地区,发育了斜切金沙江断裂的德钦—中甸—大具断裂、NNW 向的维西—乔后断裂、NE 向程海断裂及龙蟠—乔后断裂 (赵小艳, 付虹, 2014; 李见等, 2022)。该地区新构造运动强烈,主要表现为强烈的升降运动和断块运动 (谢富仁等, 1994),近年来中强震频发;该边界带南接深大的 NW 向红河断裂带,作为印度板块向欧亚板块碰撞过程中形成的重要深大断裂带,在晚更新世以来,其主断裂中、南段地震活动性较低 (向宏发等, 2004),而地震多发于断裂北段的滇西大理周围及南段与红河断裂带走向近乎一致的石屏—建水断裂和通海—曲江断裂附近。

随着流动重力观测工作的进一步加强以及重力测网的优化改造,云南已形成包括云南全境及周边地区的 245 个测点、260 余测段及 8 个绝对点 (蒙自、思茅、耿马、瑞丽、下关、昆明、乡城、丽江) 控制的流动重力测网 (图 1b),绝对点点值精度优于 $5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (黄江培等, 2023)。测网测点整体呈北密南疏分布,覆盖测区主要活动断裂,能有效监测云南地区及其邻区的主要构造带活动,识别测区内 5 级以上地震引起的相关重力变化 (王青华等, 2019)。漾濞地震震中区域的测点分布较为密集,平均点间距约 20 km。为去除季节性降雨变化的影响,获取区域重力场变化与地壳运动和深部物质分布的关系,云南省地震局信息中心每年上、下半年定期开展两期观测,采用高精度 CG-5 型重力仪进行观测,平差的处理采用中国地震局实用化攻关推广的应用软件 LGADJ,利用经典网平差方法进行平差处理,并重新估计了仪器的一次项系数,获取的观测资料的平均点值精度均达到或接近 $10 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

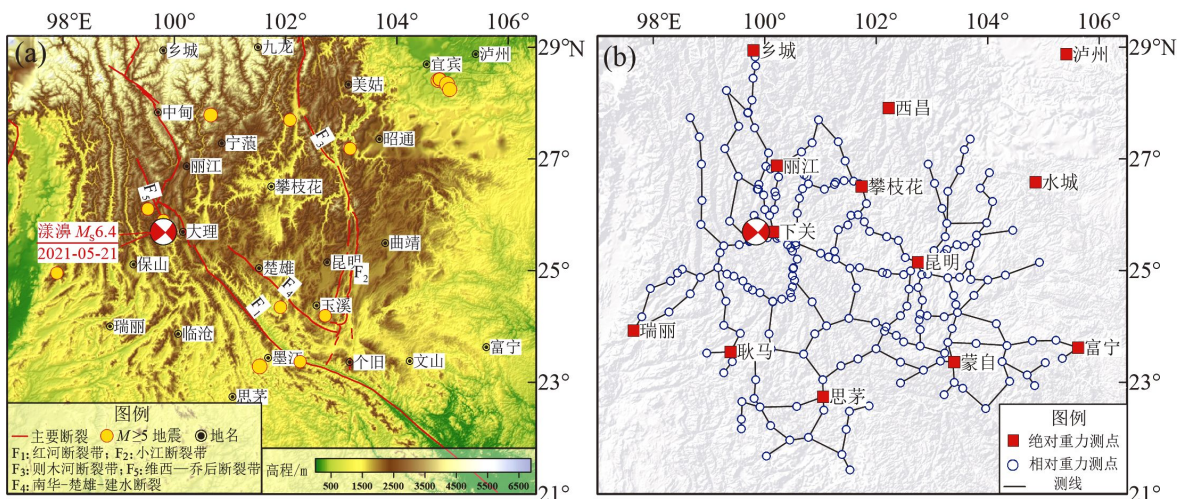


图1 云南地区地质构造图 (a) 及流动重力测网分布 (b)

Fig. 1 Geological structures (a) and the mobile gravity survey network (b) in Yunnan

2 方法原理

2.1 段差指标量定义

本文以重力段差变化叠加段差误差可视化的形式,对重力场的变化进行定量分析,并引入段差变化指标量 G 值和 C 值 (李晓一等, 2017; 王同庆等, 2018) 来分析区域重力场变化的显著性程度,作为分析重力场变化与强震之间关系的定量依据。

$$G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(dg_i)^2}{e_i^2} \quad (1)$$

式中: N 为有效测段个数; dg_i 为第 i 个测段的重力变化大小; e_i 为第 i 个测段的测量误差; 指数 G 反映测网整体产生重力异常的程度。当 $0 < G < 1$ 时,认为测网没有发生可以观测到的区域重力场变化;当 $G > 1$ 时,认为测网整体存在重力场变化信号。

$$C_i = \frac{N_c}{N} \quad (2)$$

式中: N_c 为大于 C 倍误差变化的测段数目 (i 取 1、2、3 时, C 相应地也取 1、2、3); 取不同的值时 N 为 N_1 、 N_2 、 N_3 , 即对应不同 C_1 、 C_2 、 C_3 , 反映了大于 C 倍误差变化的测段所占比例。

2.2 欧拉反褶积方法

欧拉反褶积方法是一种自动或半自动的、能估算出场源位置的反演方法,该方法在勘探重力学领域已得到了广泛的应用,近年来也被应用于地震重力反演,为深部孕震环境特征研究提供了一种思路 (高倩, 陈石, 2015; 翟丽娜等, 2020)。其计算公式为:

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (3)$$

式中: 位场异常为 T ; 位场三方向导数为 $\frac{\partial T}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial z}$; 测点位置为 (x, y, z) ; 场源位置为 (x_0, y_0, z_0) ; B 为背景常数; N 为构造指数。 N 是位场异常与场源深度变化的衰减率,与场源几何结构密切相关,构造指数一般为 0 ~ 3 (范美宁, 孙运生, 2005)。计算时首先对数据进行网格化,并根据位场三方向的异常获取三方向的梯度,优选合适的构造指数和滑动窗口,在窗口内对所有网格点建立欧拉方程,通过最小二乘方法求解异常源的位置。

3 区域重力场变化

3.1 地震前后的重力场变化特征

漾濞 $M_s 6.4$ 地震前, 2016—2018 年 2 a 尺度的累积重力变化 (图 2a) 呈现出: 以大理为中心

200 km 范围内呈南北负、东西正的四象限重力分布特征, 正负重力变化差值约 $40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 且四象限的变化模式与震源机制的压缩和张力区一致, 表明在构造应力作用下, 震中附近的物质迁移可能是区域重力场变化的原因。而 2018—2020 年的重力变化又转为东正西负的高梯度带 (图 2b), 漾濞地震震中位置就位于高梯度带零等值线的拐弯处。然而, 这个高梯度带在震前半年内发生了反转 (图 2c), 表现为与红河断裂带

及维西—乔后断裂走向较为一致的西南正、东北负的变化特征, 显示出与活动构造的显著相关性。总体而言, 漾濞地震震中均处于重力高梯度带附近, 或高梯度带转折中心。震后半年以震中为中心, 重力场仍然表现为微弱的四象限分布特征 (图 2d), 且沿着红河断裂带中南段呈现为明显的重力增加特征, 表明该地区可能存在能量积累和深部物质运移, 2021 年 6 月 10 在该区域附近发生了双柏 5.1 级地震。

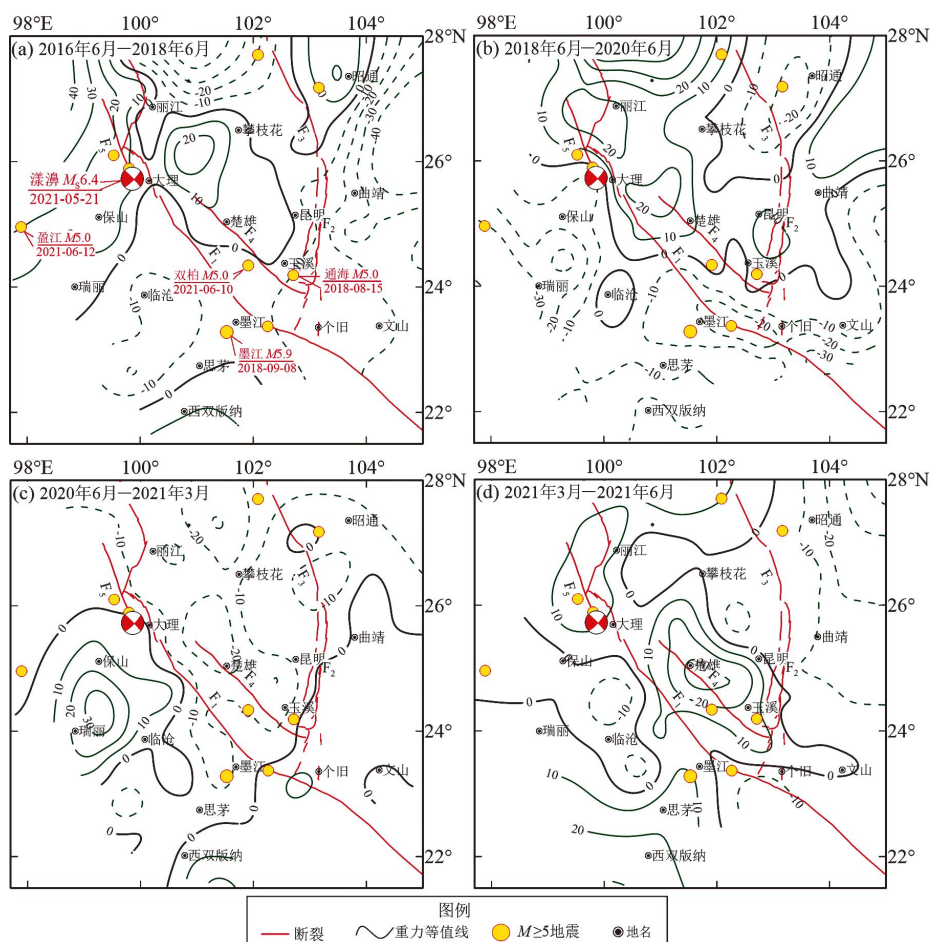


图 2 漾濞 $M_s 6.4$ 地震前后的重力场变化特征

Fig. 2 Gravity field variations before and after the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake

3.2 区域重力场差分段差可视化分析

对相邻两期重力进行差分得到 2016—2021 年 1 a 尺度的重力场时空变化, 并基于重力段差表示方法对 1 a 尺度的重力场变化特征、重力段差值、段差变化量和测量误差进行可视化分析。图 3 中, 椭圆的长轴表示相邻两测点重力段差值大小, 与箭头同方向的椭圆半轴的长度表示测量

误差值的大小, 箭头的长度代表相邻两期重力段差变化值大小, 箭头指向段差变化增大的方向 (李晓一等, 2017)。当箭头的长度超过椭圆半轴的长度, 说明段差变化值大于测量误差值, 意味着测段发生了显著性的重力变化, 若箭头未超出椭圆范围, 则意味着段差变化值小于测量误差值。

从图 3 可以看出, 研究区大部分箭头的长度超过了椭圆半轴的长度, 表明研究区整体呈现出显著的段差变化, 且相对重力观测资料的精度和可靠性较好。在重力测网边缘地区, 由于测点分布较少, 且多为单条测线, 并未闭合成环, 存在部分测段段差变化值小于测量误差值的情况。可见, 段差表示法有助于分析观测数据中不可靠的部分, 可作为筛选数据、判定异常的参考依据, 从而更直观地了解段差变化较大区域。

图 3 显示, 段差变化箭头看似杂乱但仍有一定的规律可循: 空间分布上, 段差变化箭头较为明显的区域集中在研究区主要活动断裂带附近, 主要分布在近期地震活动较为频繁的滇西—滇西北及滇南—滇西南地区。时间尺度上, 2021 年漾濞 6.4 级地震前 (图 3a~d), 研究区出现大

的区域性重力变化—局部重力场变化—四象限分布特征—大范围的区域性正变化的重力演化过程, 段差变化箭头较为明显的区域主要集中在滇西至滇西北的大理—丽江一带及滇南至滇西南一带。2016 年 6 月—2017 年 6 月, 震中附近段差箭头更多指向南, 且紧邻震中的段差并不大, 主要分布在震中附近 200 km 范围内 (图 3a)。2017 年 6 月—2018 年 6 月, 整个测区段差变化明显减小, 箭头指向较为分散和无序 (图 3b)。2018 年 6 月—2019 年 6 月, 测区重力变化则较为剧烈, 且沿着大理附近呈现出明显的四象限分布特征 (图 3c), 震中东北的攀枝花—永胜及震中西南的保山—瑞丽一带重力场呈现为明显的负异常变化, 幅值约为 $(-40 \sim -20) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$, 震中附近的段差变化箭头更多指向西北方向,

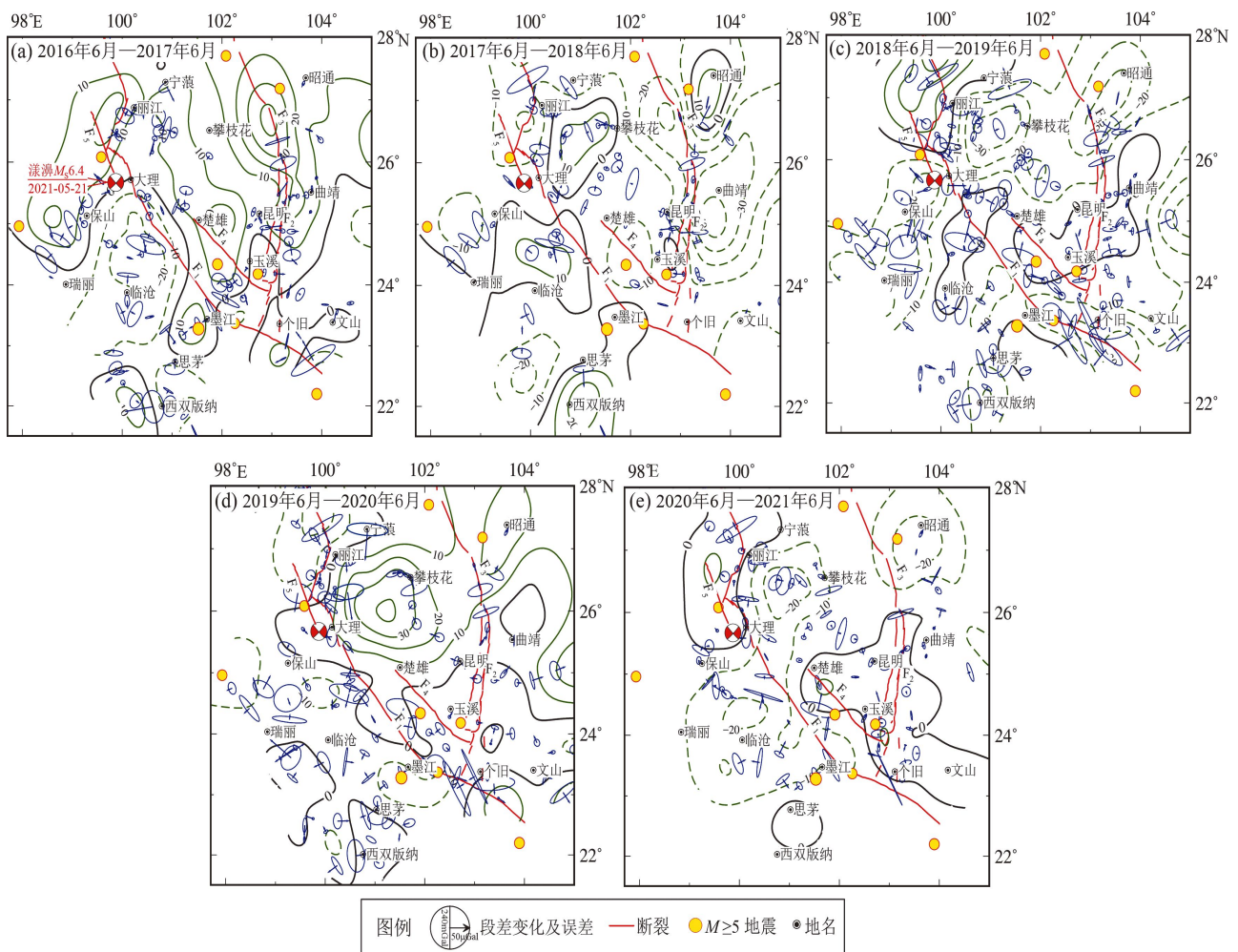


图 3 研究区重力差分变化及段差变化

Fig. 3 Annual gravity variations and gravity segment differences in Yunnan from 2016 to 2021

这可能意味着在震前两年震区附近构造运动开始增强， $M_s6.4$ 漾濞地震就发生在四象限中心附近。与上一期相比，2019 年 6 月—2020 年 6 月研究区重力呈现出反向变化特征，沿着滇西北到滇中地区呈现出由负到正的重力变化高梯度带，震中位于高梯度带的零等值线附近，且段差变化箭头更多指向东南方向（图 3d），这可能反映了漾濞地震前震源区深部物质沿着红河断裂北段朝着震源区方向运移的动力学过程。2020 年 6 月—2021 年 6 月震中附近重力变化则趋于平缓，且与上一期重力场变化呈现反向（图 3e），段差变化明显的区域集中在震中以南及震中以北的大理—丽江—中甸一带，段差变化幅度大多集中在 $\pm 20 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 范围内，这可能是由地震发生后，震区的应力和能量得到释放，区域构造活动减弱，震后物质不断调整所致。多期图像显示，漾濞地震震中均处于四象限中心或零等值线拐弯处。

3.3 重力段差变化指标量分析

在上述云南地区重力场变化及段差变化可视化分析的基础上，本文对多期重力段差变化进行了统计分析。表 1 和图 4 分别给出了 2016—2021 年 1 a 尺度流动重力测段段差的变化、误差情况及段差变化分布统计直方图，可看出整体测段的

观测平均误差控制在 $8 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 以内，说明观测结果较为可靠。震前 2018—2019 年的段差平均变化量较为明显，但在震后则明显下降。图 4 显示 2016—2021 年研究区段差变化基本都较为集中地分布在 $\pm 30 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 范围内，而震前两年的统计特征分布呈现明显的不均衡性。段差变化在震前两年呈现为明显的大区域尺度的重力减小，而在震前一年则表现为反向变化，呈现为大范围的重力增加。这些基于重力段差变化的统计特征直观地反映出在漾濞 $M_s6.4$ 地震前研究区整体具有较为明显的重力不平衡变化。

根据第 2 节中对重力场变化指标和值的定义，本文获取了 2016—2021 年云南测网每年第二期

表 1 2016—2021 年重力段差变化统计情况
Tab. 1 The statistics of gravity segment differences in Yunnan from 2016 to 2021 单位： 10^{-8} m/s^2

观测年份	观测最大	观测最小	观测平均	最大段差	段差平均
	误差	误差	误差	变化量	变化量
2016—2017年	23.69	0.51	6.29	63.00	9.8
2017—2018年	17.49	0.51	6.58	45.00	9.0
2018—2019年	22.05	0.71	7.43	55.00	13.2
2019—2020年	26.22	0.51	6.95	49.00	10.8
2020—2021年	17.20	0.14	6.54	35.99	8.3

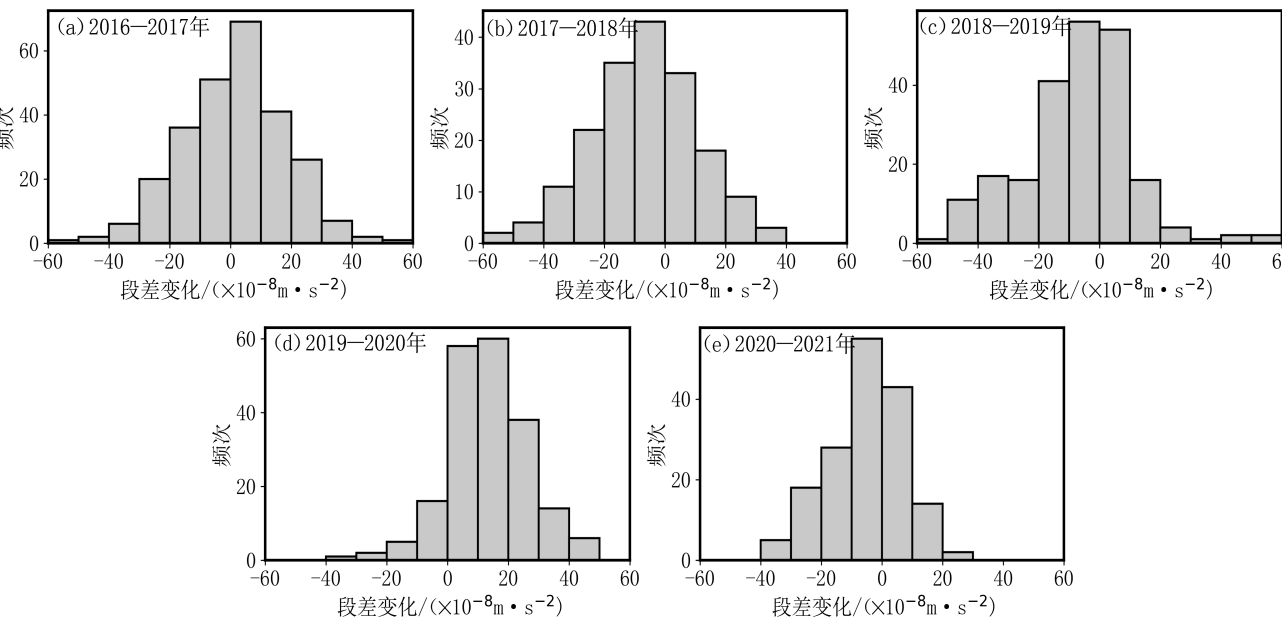


图 4 2016—2021 年时段 1a 尺度重力段差变化统计特征

Fig. 4 Statistical features of annual gravity segment differences in Yunnan from 2016 to 2021

观测结果计算获得的该区域整体的重力变化显著性程度。由图 5 可见, G 值和 C 值随时间的变化趋势基本一致, G 值在 2018 年前呈现出较为平缓的减弱趋势, 而在 2018—2019 年则表现为突然上升, 2019—2020 年稍微有所下降, 继而发生了漾濞 6.4 级地震, 而震后 G 值和 C 值则明显下降。2017—2018 年 5 级以上地震较为平静, 在 2017 年 3 月 27 日发生漾濞 5.1 级地震, 2018 年 8 月发生通海两次 5.0 级地震, 同年 9 月发生墨江 5.9 级地震, 而 2019—2020 年测区中强震趋于平静, 继而发生漾濞 6.4 级地震, 同年 6 月又相继发生了双柏 5.1 级地震及盈江 5.0 级地震, 而中强地震事件发生频率基本与指标量和值变化趋势吻合。通过对比分析可以看出, 2016—2021 年研究区地震活动性与同期的 G 值、 C 值的变化规律也具有较好的一致性, 地震活动性存在与指标量和值类似的大幅度降低和小尺度上升的趋势, 表明指标量 G 值和 C 值所揭示的重力场变化的显著性异常程度与地震活动密切相关。

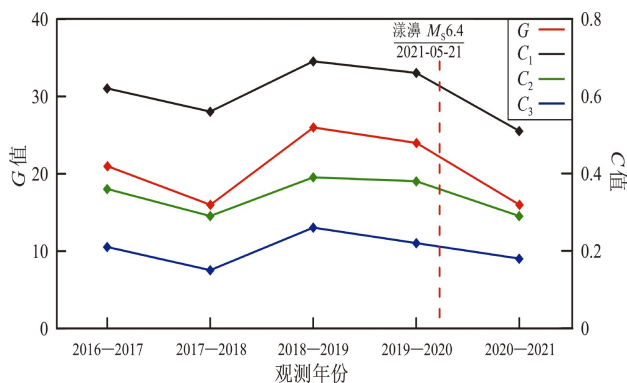


图 5 2016—2021 年云南地区 G 值和 C 值变化图

Fig. 5 Variation of G value and C value in Yunnan from 2016 to 2021

4 重力变化场源特征反演

结合云南地区复杂的地质构造背景, 分别在上地壳、中地壳和下地壳设置 3 个直六面体模型, 以模拟位于不同深度位置的场源体。设置地表测网点间距为 5 km, 测网长度均为 180 km, 模型 1 位于上地壳: $X(80,110)$ 、 $Y(110,115)$ 、

中心埋深 5.5 km; 模型 2 位于中地壳: $X(50,60)$ 、 $Y(70,80)$, 中心埋深 11.5 km; 模型 3 位于下地壳: $X(80,110)$ 、 $Y(60,90)$, 中心埋深 22.5 km, 异常体的密度差为 $3 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, 模型在地表产生的重力异常为 $0 \sim 120 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 。

通过多次试验优选构造指数为 1.2, 滑动窗口为 8, 并基于 2016—2021 年云南地区第二期年尺度差分重力数据进行场源反演, 获取了场源三维空间分布特征, 圈定了场源可能的位置和深度。且针对欧拉反演解存在发散的问题, 采用水平梯度滤波法来消除发散解, 提高解的收敛性 (范美宁, 孙运生, 2005; 郑秋月等, 2021)。图 6 中蓝色圆圈表示反演的场源位置, 圆圈大小表示不同反演解的深度。如果将地表的局部影响和测量数据的不确定性看做一种随机过程, 那么不同时间尺度的重力场变化相互对比, 在地壳深部场源的重力变化特征应该具有一致性和相似性, 而通过对不同时段内的反演结果进行相似性分析, 认为那些一致性较好的区域, 是较可靠的异常源位置 (高倩, 陈石, 2015)。

多期反演结果显示欧拉解分布在研究区内主要活动断裂附近, 位于中下地壳, 反演解深度主要集中在 $(25 \pm 10) \text{ km}$, 其中汇聚度较高的区域主要集中在红河断裂北段至滇西北一带及滇南至滇西南的局部区域, 而该区域是近年中强地震较为活跃的区域, 说明反演场源位置与区域内的多次中强地震活动相关。从时间尺度上看, 2021 年漾濞 $M_s 6.4$ 地震前, 在震中以北丽江至乡城一带场源解呈现逐年的累积叠加, 而该区域受青藏高原物质东南向挤出的影响, 同时又受到兰坪—思茅地块的阻挡, 导致该区域产生 NNW 至 SN 向的构造应力场 (龙锋等, 2021; 王光明等, 2021)。在发震前两年这种解的汇聚逐渐呈现南向推移, 主要集中在大理至红河断裂带中北段区域, 且表现出与维西—乔后断裂及红河断裂带走向较为一致的 NW 向分布特征, 与震源区活动断裂紧密联系, 可能存在着较为强烈的深部物质运移。震后一年反演解汇聚在震中以北大理—丽江区域及震中西南部红河断裂带北段沿线上, 这可能与震后物质的调整相关。

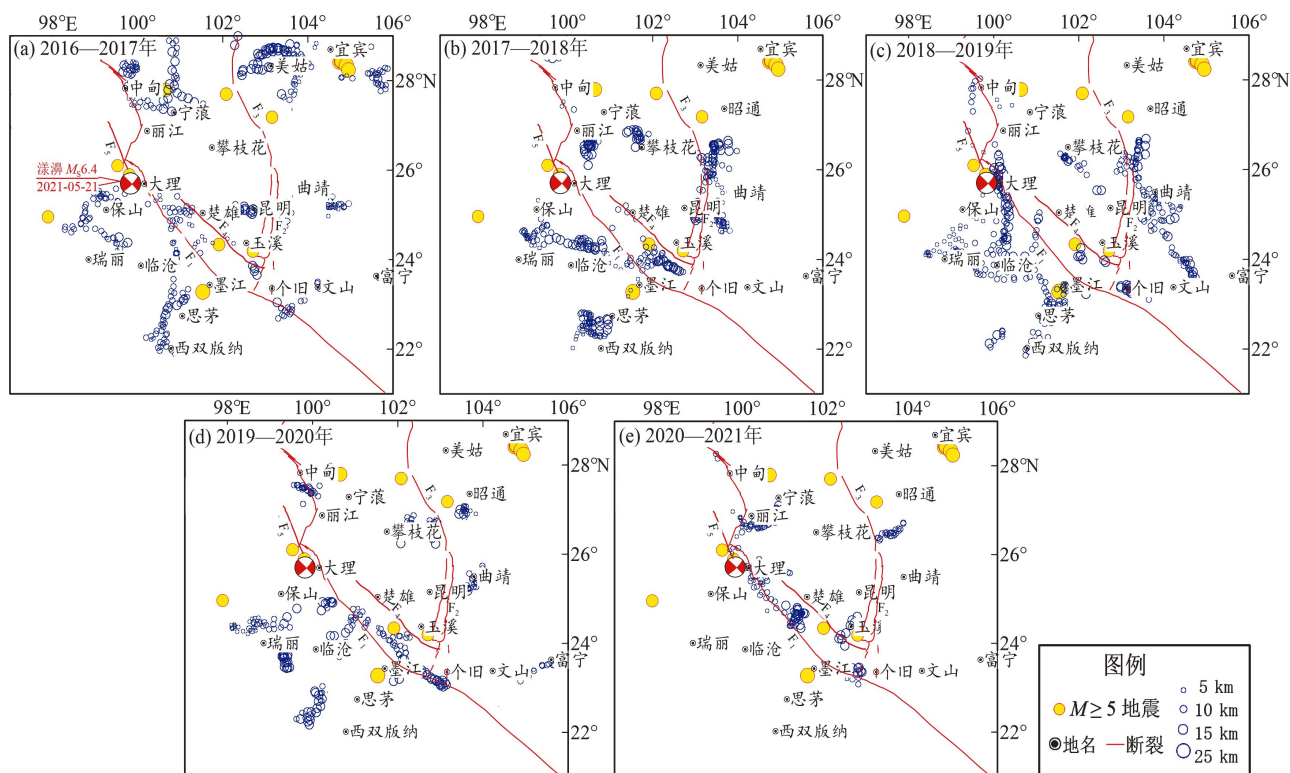


图6 2016—2021年云南地区重力场变化反演的场源特征空间分布

Fig. 6 Distribution of the field source characteristics inverted based on the gravity variation in Yunnan from 2016 to 2021

5 结论

本文利用2016—2021年云南地区的流动重力观测资料,在深入分析重力场变化特征的基础上,基于重力段差值的重力场可视化方法和显著性指标量,开展了2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震前研究区重力变化及场源特征的定性和定量研究,并讨论了研究区近期重力场的时空动态演化特征及可能的构造动力学含义,得到如下结论:

(1) 2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震前,重力场表现为区域性重力变化—局部重力场变化—四象限分布特征—大范围的区域性正变化—重力反向变化的演化过程,对应段差变化箭头较为明显的区域主要集中在震中附近滇西至滇西北的大理—丽江一带及近期中强震频发的滇南至滇西南一带重力场变化。与地震活动密切相关,且震前一年重力段差较为明显的区域呈东南向指向,可能反映了震前与漾濞地震相关的震源区深部物质迁移的动

力学过程。

(2) 2021年漾濞 $M_s6.4$ 地震前段差变化及重力变化指标量 G 和 C 值均出现明显增加,震后又迅速回落,重力段差变化显著性的指标量 G 值和 C 值可用于评价区域重力场变化的显著性程度,且指标量变化趋势与同期中强地震事件发生频率相吻合,揭示了重力场变化的显著性异常程度与地震活动密切相关。

(3) 反演得到场源解主要集中在红河断裂北段至滇西北一带及滇南至滇西南的局部地区,深度主要集中在 (25 ± 10) km。漾濞 $M_s6.4$ 地震前在震中以北丽江至乡城一带出现多期场源解的累积叠加,而该区域受青藏高原物质东南向挤出的影响,可能存在着较为强烈的深部物质运移,且表现出与维西—乔后及红河断裂带走向较为一致的分布特征,与震源区活动构造密切相关。

参考文献:

范美宁,孙运生. 2005. 频率域中的欧拉方程[J]. 吉林大学学报:地

- 球科学版,35(2):253-256.
- Fan M N, Sun Y S. 2005. Euler's equation in the wave number domain [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 35(2):253-256. (in Chinese)
- 高倩, 陈石. 2015. 基于欧拉反褶积方法计算川滇交界重力变化场源特征[J]. 地球物理学进展, 30(2):503-509.
- Gao Q, Chen S. 2015. Based on the Euler deconvolution technique to determine the field source characteristics of gravity variation in the Boundary of Sichuan and Yunnan [J]. Progress in Geophysics, 30(2):503-509. (in Chinese)
- 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[J]. 中国地震, 35(3):417-430.
- Hu M Z, Hao H T, Li H, et al. 2019. Quantitative analysis of gravity changes for earthquake prediction [J]. Earthquake Research in China, 35(3):417-430. (in Chinese)
- 黄江培, 曹颖, 刘东, 等. 2022. 漾濞 $M_s6.4$ 地震前后的重力变化特征及其孕震含义分析[J]. 地震地质, 44(6):1557-1573.
- Huang J P, Cao Y, Liu D, et al. 2022. Analysis of gravity variation characteristics and its seismogenic meaning before and after Yangbi $M_s6.4$ earthquake [J]. Seismology and Geology, 44(6):1557-1573. (in Chinese)
- 黄江培, 杜家云, 曹颖, 等. 2023. 云南流动重力观测中相对重力仪漂移估计方法[J]. 地震研究, 46(4):511-520.
- Huang J P, Du J Y, Cao Y, et al. 2023. The estimation method of the zero drift of the relative gravimeter in high-precision time-varying gravity observation in Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 46(4):511-520. (in Chinese)
- 李见, 张翔, 杨志坚, 等. 2022. 漾濞 6.4 级地震前后大理地区温泉水化学组分特征分析[J]. 华南地震, 42(3):36-47.
- Li J, Zhang X, Yang Z J, et al. 2022. Analysis of chemical composition characteristics of hot spring water in Dali area before and after the Yangbi $M6.4$ earthquake [J]. South China of Seismology, 42(3):36-47. (in Chinese)
- 李静, 万晓云, 徐铭. 2023. 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的 2007 年印尼明古鲁 $M_w8.4$ 地震同震重力梯度信号对比分析[J]. 地震研究, 46(4):521-528.
- Li J, Wan X Y, Xu M. Comparative analysis of the coseismic gravity gradient signals of the 2007 Bengkulu, Indonesia $M_w8.4$ earthquake based on GRACE satellite data and the dislocation model [J]. Journal of Seismological Research, 46(4):521-528. (in Chinese)
- 李晓一, 陈石, 卢红艳. 2017. 离散时变重力数据的可视化、指标量定义与解释[J]. 地震学报, 39(5):682-693.
- Li X Y, Chen S, Lu H Y. 2017. The index definition, interpretation and visualization of discrete time-variable gravity data [J]. Acta Seismologica Sinica, 39(5):682-693. (in Chinese)
- 刘东, 郝洪涛, 王青华, 等. 2021. 2021 年云南漾濞 $M_s6.4$ 地震前重力变化[J]. 地震地质, 43(5):1157-1170.
- Liu D, Hao H T, Wang Q H, et al. 2021. Gravity field change before the 2021 Yangbi $M_s6.4$ earthquake, Yunnan [J]. Seismology and Geology, 43(5):1157-1170. (in Chinese)
- 龙锋, 祁玉萍, 易桂喜, 等. 2021. 2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震序列重新定位与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 64(8):2631-2646.
- Long F, Qi Y P, Yi G X, et al. 2021. Relocation of the $M_s6.4$ Yangbi earthquake sequence on May 21, 2021 in Yunnan Province and its seismogenic structure analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(8):2631-2646. (in Chinese)
- 王光明, 吴中海, 彭关灵, 等. 2021. 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_s6.4$ 地震的发震断层及其破裂特征: 地震序列的重定位分析结果[J]. 地质力学学报, 27(4):662-678.
- Wang G M, Wu Z H, Peng G L, et al. 2021. Seismogenic fault and its rupture characteristics of 21 May, 2021 Yangbi $M_s6.4$ earthquake: analysis results from relocation of earthquake sequence [J]. Journal of Geomechanics, 27(4):662-678. (in Chinese)
- 王青华, 郝洪涛, 汪健, 等. 2019. 云南地震流动重力监测网建设与映震能力分析[J]. 大地测量与地球动力学, 39(3):317-324.
- Wang Q H, Hao H T, Wang J, et al. 2019. Construction and analysis of seismic response capability of gravimetric network in Yunnan [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 39(3):317-324. (in Chinese)
- 王同庆, 陈石, 梁伟锋, 等. 2018. 2016 年门源 $M_s6.4$ 地震前的区域重力场变化与定量参数分析[J]. 地震地质, 40(2):349-360.
- Wang T Q, Chen S, Liang W F, et al. 2018. Variations of the gravity field and quantitative parameter analysis before the 2016 Menyuan $M_s6.4$ earthquake [J]. Seismology and Geology, 40(2):349-360. (in Chinese)
- 文翔, 季灵运, 向巍, 等. 2022. 华南地区流动重力变化异常指标分析[J]. 华南地震, 42(4):117-126.
- Wen X, Ji L Y, Xiang W, et al. 2022. Anomaly index analysis of mobile gravity changes in South China [J]. South China of Seismology, 42(4):117-126. (in Chinese)
- 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 2004. 红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形[J]. 地震地质, 26(4):597-610.
- Xiang H F, Han Z J, Guo S M, et al. 2004. Large-scale dextral strike-slip movement and associated tectonic deformation along the Red River fault zone [J]. Seismology and Geology, 26(4):597-610. (in Chinese)
- 谢富仁, 刘光勋, 梁海庆. 1994. 滇西北及邻区现代构造应力场[J]. 地震地质, 16(4):329-338.
- Xie F R, Liu G X, Liang H Q. 1994. Recent tectonic stress field in north-west Yunnan province and its adjacent areas [J]. Seismology and Geology, 16(4):329-338. (in Chinese)
- 翟丽娜, 贾晓东, 焦明若, 等. 2020. 基于欧拉反褶积方法计算辽宁地区重力变化场源特征[J]. 地震研究, 43(2):388-393.
- Zhai L N, Jia X D, Jiao R M. 2020. Determine the field source characteristics of gravity variation in Liaoning based on the Euler deconvolution technique [J]. Journal of Seismological Research, 43(2):388-393. (in Chinese)

- 赵小艳,付虹. 2014. 2013年洱源 $M_s5.5$ 和 $M_s5.0$ 地震发震构造识别[J]. 地震学报, 36(4): 640–650.
- Zhao X Y, Fu H. Seismogenic structure identification of the 2013 Eryuan $M_s5.5$ and $M_s5.0$ earthquake sequence[J]. Acta Seismologica Sinica, 36(4): 640–650. (in Chinese)
- 赵云峰, 祝意青, 隗寿春, 等. 2023. 2022年1月8日青海门源 $M_s6.9$ 地震前重力场动态变化[J]. 地球物理学报, 66(6): 2337–2351.
- Zhao Y F, Zhu Y Q, Wei S C, et al. 2023. Dynamic gravity changes before the Menyuan, Qinghai $M_s6.9$ earthquake on January 8, 2022[J]. Chinese Journal of Geophysics, 66(6): 2337–2351. (in Chinese)
- 郑秋月, 王青华, 刘东, 等. 2021. 基于时变重力数据的川滇地区场源模型反演和解释[J]. 地震, 41(1): 205–218.
- Zheng Q Y, Wang Q H, Liu Dong, et al. 2021. Inversion and interpretation of field-source model based on the regional time-variable gravity variations of Sichuan-Yunnan[J]. Earthquake, 41(1): 205–218. (in Chinese)
- 祝意青, 张勇, 杨雄, 等. 2022. 时变重力在地震研究方面的进展与展望[J]. 地球与行星物理理论评, 53(3): 278–291.
- Zhu Y Q, Zhang Y, Yang X, et al. 2022. Progress of time-varying gravity in seismic research[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 53(3): 278–291. (in Chinese)
- 祝意青, 张勇, 张国庆, 等. 2020. 21世纪以来青藏高原大震前重力变化[J]. 科学通报, 65(7): 622–632.
- 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[J]. Chinese Science Bulletin, 65(7): 622–632. (in Chinese)
- Chen S, Liu M, Xing L L, et al. 2016. Gravity increase before the 2015 $M_w7.8$ Nepal earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 43(1): 111–117.
- Wang L H, Chen S, Zhuang J C, et al. 2023. Gravity field changes reveal deep mass transfer before and after the 2013 Lushan earthquake[J]. Communications Earth & Environment, 4: 194.
- Xing L L, Liu Z W, Jia J G, et al. 2021. Far-field coseismic gravity changes related to the 2015 $M_w7.8$ Nepal(Gorkha) earthquake observed by superconducting gravimeters in China continent[J]. Earth and Planetary Physics, 5(2): 141–148.
- Yang J L, Chen S, Zhang B, et al. 2021. Gravity observations and apparent density changes before the 2017 Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake and their precursory significance[J]. Entropy, 23(12): 1687.

Analysis of the Gravity Variation Index before the Yangbi $M_s6.4$ Earthquake and Inversion of the Field Source Characteristics

ZHENG Qiuyue, HUANG Jiangpei, WU Yuqin, CHEN Zhengyu, LIU Dong, WANG Qinghua
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract

In this paper, we use the visualization method of the gravity segment differences and the quantitative indicators of gravity variation G and C , to process the mobile gravity data obtained by repeated measurements in Yunnan from 2016 to 2021 and study the gravity variation before the Yangbi $M_s6.4$ earthquake on May 21, 2021. We further invert the distribution characteristics of seismic-related source in the study area. The results are as follows: ① The scale and the direction of the gravity segment indicated more or less the migration direction of the subsurface material, and the gravity variation indicators G and C increased significantly before the Yangbi earthquake, then decreased rapidly after the earthquake. G and C can be used to evaluate the significance of the regional gravity changes in the area covered by the gravity observation network. ② The inverted positions of the field-source mainly concentrated in the zone from the northern section of the Red River Fault Zone to the northwestern Yunnan, exhibiting a distribution pattern consistent with the Weixi–Qiaohou Fault and the Red River Fault Zone; this situation was possibly correlated with the migration of the deep material in the middle and upper Crust before the Yangbi earthquake.

Keywords: gravity segment differences; quantitative analysis; gravity variations index; field–source inversion; the Yangbi $M_s6.4$ earthquake