

徐声鑫, 黄江培, 郑秋月, 等. 2025. 强震前重力变化数据重构及视密度反演——以 2021 年漾濞 6.4 级地震为例[J]. 地震研究, 48(4): 631–640, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0064.

Xu S X, Huang J P, Zheng Q Y, et al. 2025. Reconstruction of relative gravity data and inversion of apparent density: A case study of the 2021 Yangbi  $M_s$  6.4 earthquake [J]. *Journal of Seismological Research*, 48(4): 631–640, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0064.

## 强震前重力变化数据重构及视密度反演 ——以 2021 年漾濞 6.4 级地震为例\*

徐声鑫, 黄江培\*, 郑秋月, 曹 颖, 吴宇琴

(云南省地震局, 云南 昆明 650024)

**摘要:** 针对相对重力观测过程中可能受到环境等因素影响而出现高频信号和局部异常的情况, 以 2021 年漾濞 6.4 级地震前重力变化为例, 通过时空平滑约束重构重力变化数据, 对比重构前后重力变化情况。基于球坐标系下六面体模型模拟场源体介质, 反演场源视密度变化, 分析场源区介质密度演化特征。结果显示: 观测数据经过时空平滑重构后, 在不改变总体变化趋势的情况下, 标准差由  $17.86 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  降到  $8.99 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 变化值区间从  $(-74.20 \sim 66.28) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  降到  $(-21.79 \sim 27.70) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ , 数据离散程度得到有效压缩, 并能压制高频信号和局部噪声, 孕震区域内重力变化时空演化趋势更加连续, 便于异常特征的识别。场源区视密度变化显示有一个明显的 NW–SE 向物质迁移过程, 在经过震中位置后逐渐收缩, 在震中位置形成一个“孤岛”形态。孕震过程中正负变化分界线从 SW–NE 向转为 NW–SE 向, 在分界线与构造走向一致后随即发震。

**关键词:** 时空平滑; 数据重构; 视密度; 六面体; 辨识度; 漾濞 6.4 级地震

**中图分类号:** P315.726 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2025)04-0631-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0064

### 0 引言

强震孕育、发展、调整过程相关的构造运动可能伴随深部物质迁移, 引起地表重力变化。特别是在 6.0 级以上地震的孕育发生过程中, 可能出现较为明显的重力变化异常, 是可能的地震前兆现象之一 (Chen et al, 2016; 祝意青等, 2020; 李静等, 2023)。通过分析 1975 年海城 7.3 级、1976 年唐山 7.8 级地震前后重力场变化特征, 陈运泰等 (1980) 发现震前重力变化量级远比地面高程变化所引起的重力变化要大, 因此提出了深部物质迁移的可能性。此后, 国内外学者对大震

前后区域重力场变化机理进行了研究, 提出了多种引起重力场变化的孕震模式, 主要有地壳上升模式、密度变化模式、膨胀–扩容模式、质量迁移模式、莫霍面变化模式、断层错位和蠕动模式、闭锁剪力模式等 (申重阳等, 2011)。近年来, 随着观测技术的进步和观测数据的积累, 重力学科专家对一些 6.0 级以上地震的发震地点进行了较好的年度预测, 并总结了强震前重力变化的量级、范围等异常指标 (祝意青等, 2018), 但强震前重力变化的机理仍然是需要深入研究的问题。

本文以 2021 年云南漾濞 6.4 级地震为例, 收集孕震区 2016–08—2021–06 测期重力场变化数据, 通过时空平滑约束对观测数据进行重构, 降

\* 收稿日期: 2024–07–29.

基金项目: 云南省地震局地震科技专项 (2024ZX03, 2024ZX04); 中国地震局震情跟踪定向工作任务 (2024010202).

第一作者简介: 徐声鑫 (1985–), 工程师, 主要从事流动地球物理场野外数据采集相关工作.

E-mail: 408705228@qq.com.

通信作者简介: 黄江培 (1984–), 高级工程师, 主要从事利用重力数据采集及资料分析应用工作.

E-mail: 164909307@qq.com.

低高频噪声和局部异常,提高数据质量。在此基础上,基于球坐标系下六面体模型模拟场源体介质,进行地壳深部视密度变化反演(张贝等,2021),获取震源区视密度变化特征,揭示孕震过程中地壳物质运移过程,为漾濞6.4级地震孕育机理研究提供参考依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据收集与处理

2021 云南漾濞 6.4 级地震震构造为维西—巍山及其次生断裂(吴桂桔等,2021)。自 2014 年开始,笔者团队使用 2 台 CG-5 型相对重力仪,采用 A-B-C---I---C-B-A 往返测线方式进行,开展了震区及周边的流动重力观测。观测活动一般在每年的 3—5 月及 7—9 月分 2 期进行,并将绝对重力点纳入测网联测,绝对重力点每年观测 1 次,为流动重力观测提供控制基准。数据采集完成后,以绝对重力观测数据作为控制,利用基于贝叶斯估计的平差方法进行了整网解算(黄江培等,2023)。

以胡敏章等(2019)给出的异常指标范围为基础,本文以距震中 200 km 半径范围作为孕震空间域,拾取相对重力测点,如图 1 所示。根据云南中强震前重力变化特征统计,震前重力数据会出现一个上升—下降的过程,地震发生于下降阶段。

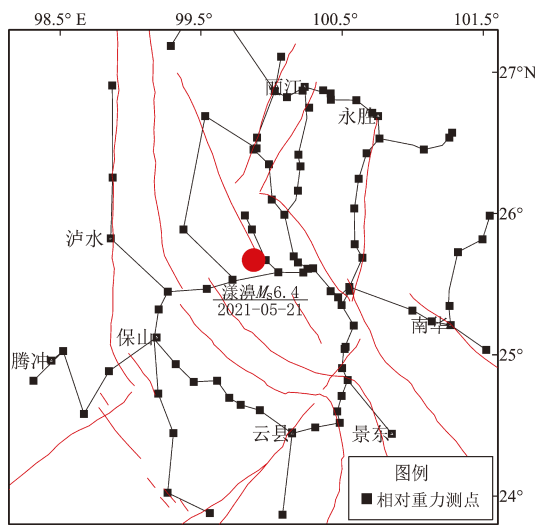


图 1 漾濞 6.4 级地震孕震区域内相对重力测点分布

Fig. 1 The distribution of the relative - gravity - measurement stations in the seismogenic zone of the Yangbi  $M_{6.4}$  earthquake

已有研究表明,漾濞 6.4 级地震前 4 年(2017-03 测期)开始出现能量聚集的现象,而 2015—2016 年的重力场变化相对平缓(黄江培等,2022)。因此,选择 2016-08 测期开始至震后 2021-06 测期结束,作为本次研究的时间范围,后期数据均与起始测期作差,获取测点的累计变化点值序列。

### 1.2 数据重构及视密度反演方法

在对流动重力观测数据进行平差解算时,根据经验公式及标定参数进行了固体潮、温度、气压、仪器高、格值及零漂等改正,但是观测时刻的外部干扰及气候因素造成的局部异常和周期性变化无法消除。这些外部因素不足以引起趋势性变化,鉴于重力场的连续性,引入二阶平滑矩阵,旨在压制该类噪声(黄江培等,2022;徐仁泰,2023),具体计算如下:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x} - \mathbf{g}) \sim N(0, \sigma_g^2) \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_t \mathbf{g}_t \sim N(0, \sigma_b^2) \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_s \mathbf{g} \sim N(0, \sigma_b^2) \quad (3)$$

$$\mathbf{B}_t = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & \\ & 1 & -2 & 1 & \\ & & \cdots & \cdots & \\ & & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 1 & 1 & & \\ 1 & -8 & 1 & \\ 1 & 1 & 1 & \end{bmatrix}$$

式中:  $\mathbf{g}$  为待估算的某个测期重力变化向量;  $\mathbf{x}$  为上节中平差解算后的该测期重力变化向量;  $\mathbf{g}_t$  为相邻 3 个测期的待估算重力变化矩阵;  $\mathbf{B}_t$  为时间平滑矩阵;  $\mathbf{B}_s$  为空间平滑矩阵。

通过对观测变化数据进行时空平滑,降低局部异常和高频噪声,提升数据质量,然后将重构数据进行视密度反演。反演过程基于球坐标系下的六面体单元(Heck, Seitz, 2007)构建场源格林函数,通过构建一个等效源模型(Chen *et al.*, 2016),以可控分辨率的网格单元模拟场源介质,通过引入时空光滑等先验条件(Li, Oldenburg, 1998),给出了时变重力场正则化反演的核心算法。该模型不需要进行测点的坐标投影变换,适合于测点间距在十几至几十千米尺度的地震流动重力数据场源建模问题,其目标函数(刘代芹等,

2021；张贝等，2021；张展伟等，2023）可表示为：

$$\Phi = W_0 \| Gm - g(x,y,t) \|^2 + \Phi_s(m) + \Phi_T(m) \quad (5)$$

式中：等式右侧第一项为观测部分，地面观测点是不规则离散分布，所以引入空间光滑约束  $\Phi_s(m)$  和时间光滑约束  $\Phi_T(m)$ ，具体形式与模型先验假设有关。 $g$  函数表示观测的不同期次重力时空变化点值； $x$ 、 $y$ 、 $t$  分别为经度、纬度和时间； $G$  为核函数，可以预先计算得到，与等效源几何参数和观测点位置相关； $m$  为待反演的等效源视密度参数； $W_0$  为权参数，与观测数据的噪声方差成反比。

第二项空间光滑约束  $\Phi_s(m)$  表示为：

$$\Phi_s(m) = \iint \left( W_1 \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} + W_2 \frac{\partial^2 m}{\partial x \partial y} + W_3 \frac{\partial^2 m}{\partial y^2} \right) dx dy \quad (6)$$

式中： $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  是与模型在空间  $dx$ 、 $dy$  和  $dxy$  方向上光滑程度相关的权系数，其物理含义是期望待求的场源模型在  $x$ 、 $xy$  和  $y$  各个水平方向上都具有二阶光滑特征，具体光滑程度与  $W_1$ 、 $W_2$  和  $W_3$  这3个超参数有关。

第三项时间光滑约束  $\Phi_T(m)$  可以表示为：

$$\Phi_T(m) = \int W_4 \frac{\partial^2 m}{\partial t^2} dt \quad (7)$$

式中： $W_4$  为模型在时间上光滑约束相关的权系数，其物理含义是期望待求的场源模型在时间上具有二阶光滑特征，光滑程度由超参数  $W_4$  控制。

在反演计算中，式（5）～（7）中的  $W_0 \sim W_4$  共5个超参数需要确定后才可以求解。为了合理确定这些超参数，本文引入贝叶斯方法中的ABIC准则来实现超参数的优化计算（Akaike，1980），具体是通过ABIC最小化实现（王林海等，2020；黄江培等，2022，2023）。

2 重力变化数据重构结果

2.1 重构数据检验

时空平滑能够压制重力变化数据周期性变化及高频噪声，但也容易出现过拟合及过平滑的情况，针对重构数据的有效性和拟合度，本文从重

构前后重力变化极值和标准差、量值分布及不同范围内均值演化特征3个方面进行对比。

2.1.1 重构前后重力变化极值和标准差

2016-08—2021-06共10个测期得到815个重力变化数据，首先对其进行重构前后重力变化数据的极值、标准差对比，结果见表1。结果显示：重构后，重力变化极值有很大的压缩，说明数据重构后离散度得到极大的改善，集簇性较好。

表1 重构前后重力变化极值及标准差对比

Tab. 1 Comparison of extreme values and standard deviations before and after reconstruction

单位：10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup>

数据类型	最大值	最小值	标准差
原始数据	66.28	-74.20	17.86
重构数据	27.70	-21.79	8.99

2.1.2 重构前后重力变化数据值段区间分布

重构后重力变化数据极值变化较大，为检验是否造成原始数据信号损失，本文从数据在各个值段上的分布改变情况进行验证，具体实现为对815个原始数据及重构数据在不同值段的出现频次进行统计，结果如图2所示。

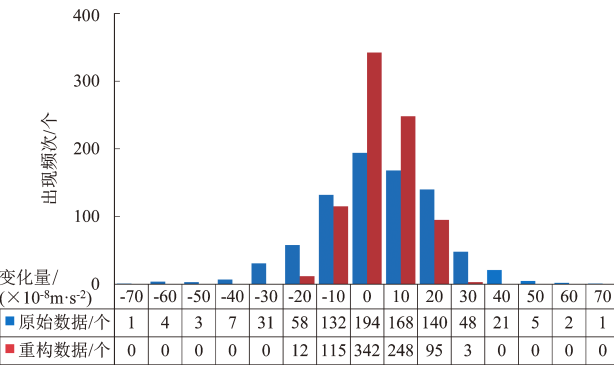


图2 原始数据及重构数据变化量值分布对比

Fig. 2 Distribution of observed and reconstructed data in different value ranges

从图2可以看出，重力变化原始数据主要分布于（-35～45）×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup>，落于该区间外的正、负变化数值均为8个，不足总样本量的1%，可视作为高频噪声，对其压制不会影响总体变化趋势；重构后数据主要分布于（-25～35）×10<sup>-8</sup> m/s<sup>2</sup>，数据集中趋势明显。

### 2.1.3 重构前后重力变化均值演化特征

重构数据对总体重力变化样本的极值和变化区间都有极大压缩,需进一步验证是否会改变数据的表征信息。平均值是反映一组数据集中趋势的指标,本文通过对比数据重构前后每个测期重力变化均值演化趋势(图3),分析重构数据的保真性。结果显示:在样本量较大的200和150 km半径区域内(图3a、b),重构前后重力变化均值基本重合;随着半径缩小,数据样本量减少,重力变化均值在100 km半径范围内2018-08测期出

现 $2.7 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的偏差(图3c);在50 km半径范围内,2018-08测期出现了 $6.4 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ 的偏差(图3d),重构后数据变化趋势更为平缓。

综合几个方面的检验结果来看,重构后数据能够极大压制局部高频噪声,且不改变总体样本量的变化趋势,但是在较小空间范围内细部特征刻画上存在差异。该差异主要由重构后小范围内数据受到总体样本量趋势的约束,对该区域内个别测期的高频信号进行了压制,使小范围变化趋近于总体变化所致。

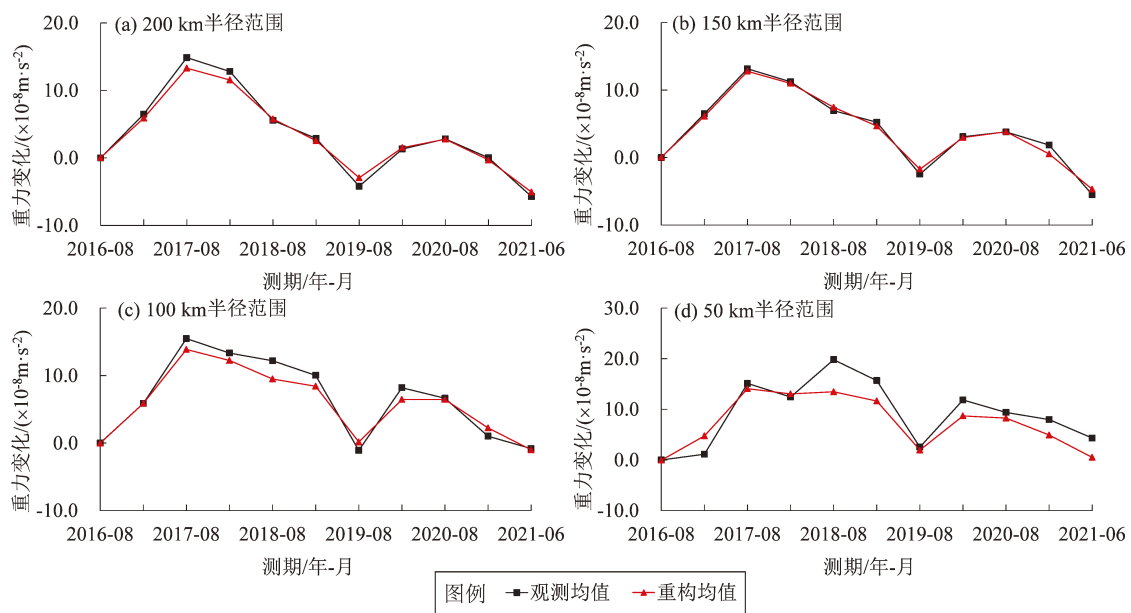


图3 不同空间域范围内重构前后重力均值变化对比

Fig. 3 Comparison of the variation of average gravity data before and after reconstruction in different ranges

从重力变化均值的历史演化特征来看,不同半径范围内,在地震发生前重力都经历了2次数据上升—下降的阶段,第二次变化幅度小于第一次,地震发生于2021年5月21日,处于第二次下降阶段,在200 km半径范围内,震前重力异常是主要表征。如果将重力变化视为孕震能量的聚散,可视为大区域范围内2017-08测期已经完成能量的聚集,50 km半径范围内聚集延续到2018-08测期,之后是能量缓慢释放的过程,地质活动剧烈时期为2017—2018年(黄江培等,2022),地震发生于大范围能量释放基本结束阶段。

### 2.2 重构后重力变化空间演化特征

重力变化重构数据在200 km半径范围内的总体演化趋势与原始数据一致,对空间不规则分布

的每个重力测点重构后累计变化特征进一步分析,结果如图4所示。

从重构的重力累计变化来看,在2016-08—2018-08测期(图4a~d)的2年时间里,有一个明显的NW-SE向的重力正负变化趋势,正负变化交界面与构造走向基本垂直;从演变过程来看,正变化起始于震中NW向,并不断向SE向迁移,在2018-03测期(图4c)正变化中心穿过震中区域后,逐渐向SW向退回,震中SE向以负变化为主(图4d)。从2018-08测期以后,负变化趋势以震中为中心,逆时针方向逐渐扩散,直至包裹整个震中区域(图4d~g),在这个过程中,震中附近一直为正变化。从2020-03测期(图4g)开始,



震中附近正变化是逐步增强的, 至2021-03测期(图4i), 正负变化交界面与2018-08测期(图4d)相比, 逆时针旋转了约 $90^\circ$ , 变化走势

与滇西的主要构造(红河断裂带及南汀河断裂带)基本平行, 随后发震; 震后正变化趋势减弱, 负变化沿逆时针方向扩散。

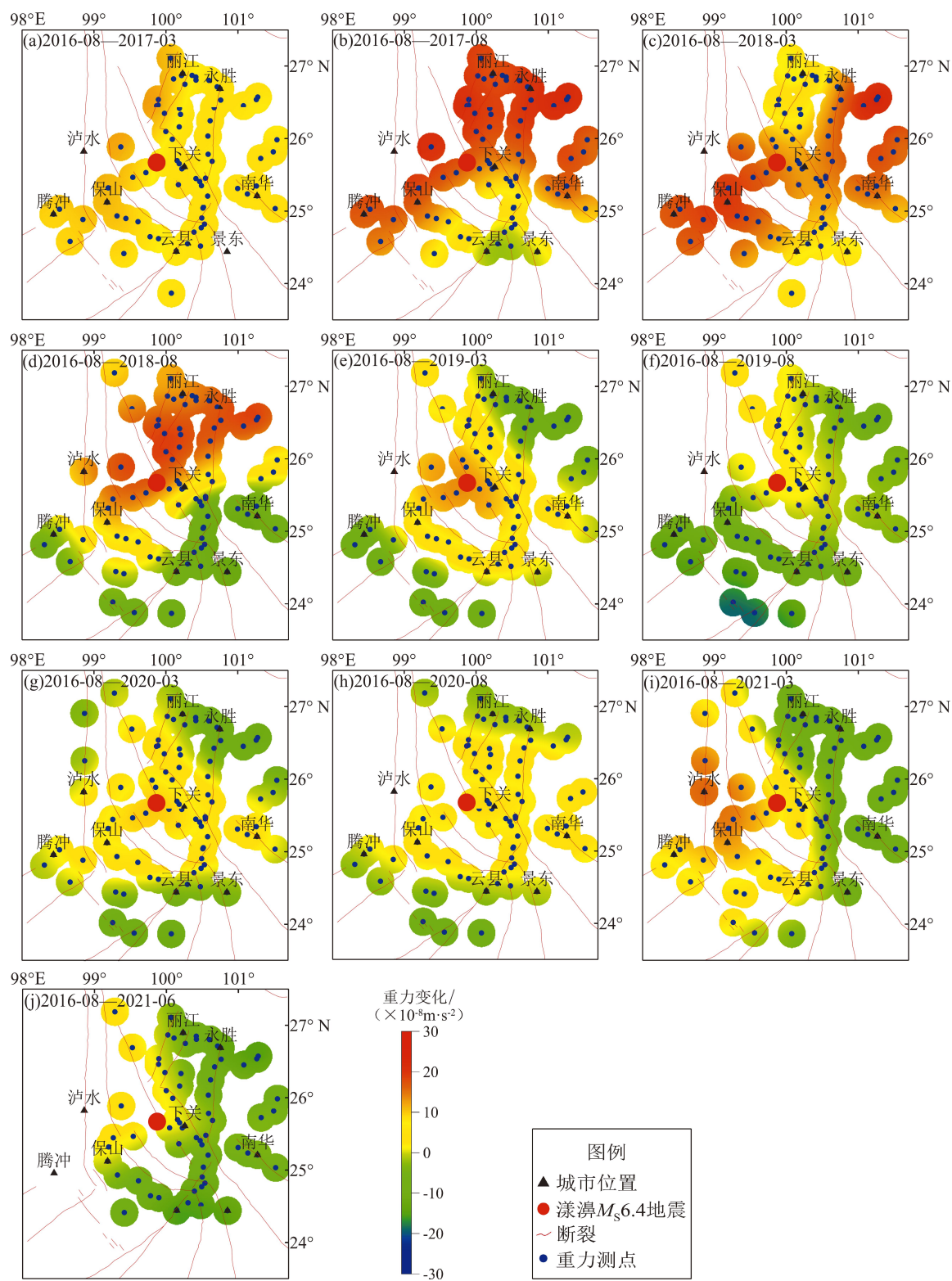


图4 累计重力变化重构结果

Fig. 4 Forward reconstruction results of cumulative gravity changes

### 3 视密度反演

#### 3.1 分辨率检测

在反演实际重力场观测数据之前,需要对不均匀分布的重力测网进行场源分辨能力测试。前人对川滇地区重力测网场源分辨能力的研究显示,丽江—下关沿线能达到  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  的空间分辨率,部分区域能达到  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (徐伟民等, 2021; 郑秋月等, 2022), 本文研究区域主要位于丽江—大理—保山沿线, 所以采用 2 种尺度分辨率进行测试。

Tesseroid 网格模型 (Heck, Seitz, 2007) 在球坐标系下可直接按经纬度划分网格而不用变换坐标系, 从而减少坐标投影变换引入的误差, 因

此, 本文采用 Tesseroid 网格作为重力异常扰动模型的基本单元。检测板方法通过设计一组正负相间的同尺度场源体 (图 5 中红蓝色块体), 利用重力正演方法得到理论重力异常, 再通过反演方法获得场源模型参数, 并与已知场源参数进行对比, 以评价空间非均匀场源分辨能力的差异性。本文分别用  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  和  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  两种尺度的场源体对研究区重力测网的场源分辨能力进行了测试。测试结果表明,  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  尺度的场源体在整个重力测网覆盖区都能得到较好的恢复, 而  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  尺度的场源体在重力测网边界及测环中心区域恢复能力存在不足。因此, 本文选择  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  尺度场源体用于场源参数反演和重力数据分析。

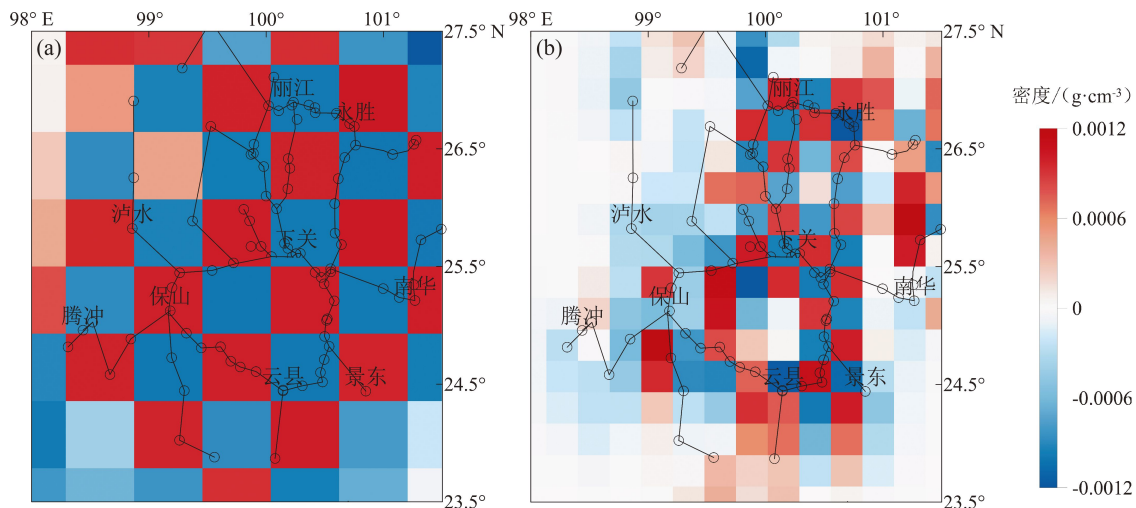


图 5  $0.50^{\circ} \times 0.50^{\circ}$  (a) 和  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (b) 不同分辨率检测结果

Fig. 5 Results from the detection with different resolutions of  $0.50^{\circ} \times 0.50^{\circ}$  (a) and  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  (b)

#### 3.2 视密度反演结果

根据模型检测结果, 以  $0.50^{\circ} \times 0.50^{\circ}$  格网划分六面体单元, 将重力变化数据带入 GEOIST 开源 Python 软件<sup>①</sup>进行视密度反演。在本次反演中模拟场源体埋深为 10 km, 每个场源模型的等效厚度为 1 km, 观测数据及各种光滑约束等权, 反演结果如图 6 所示。

视密度反演结果显示, 2016—08—2018—03 测期 (图 6a~c), 区域内视密度以正变化为主; 2018—08—2019—08 测期 (图 6d~f) 视密度逐渐从正变化转为负变化; 2020—03—2021—03 测期

(图 6g~i) 视密度主要以负变化为主。在震前 2 个月的 2021—03 测期 (图 6i), 震中西北侧出现了正变化增强的趋势; 在震后的 2021—06 测期 (图 6j), 正变化增强趋势减弱, 除了震中西侧存在局部视密度正变化, 其余区域均为负变化。综上, 从临震前到震后, 视密度是降低的; 从整个演化阶段来看, 视密度变化绝对值均在  $1 \text{ kg/m}^3$  内, 量值较小, 约为地壳平均密度的 3.7‰ (地壳密度按  $2700 \text{ kg/m}^3$  计算)。

从视密度的整个演变过程来看, 整个区域视密度经历了从增大到减小, 然后局部增大的过程。

<sup>①</sup> <https://github.com/igp-gravity/geoist>.

视密度从整个区域增大(图6a)到南侧局部转负(图6b), 然后出现四象限趋势(图6c), 再到垂

直于构造的 NS 正负变化(图6d)的过程中, 出现了相距约 220 km 的 2 个正变化中心; 之后的

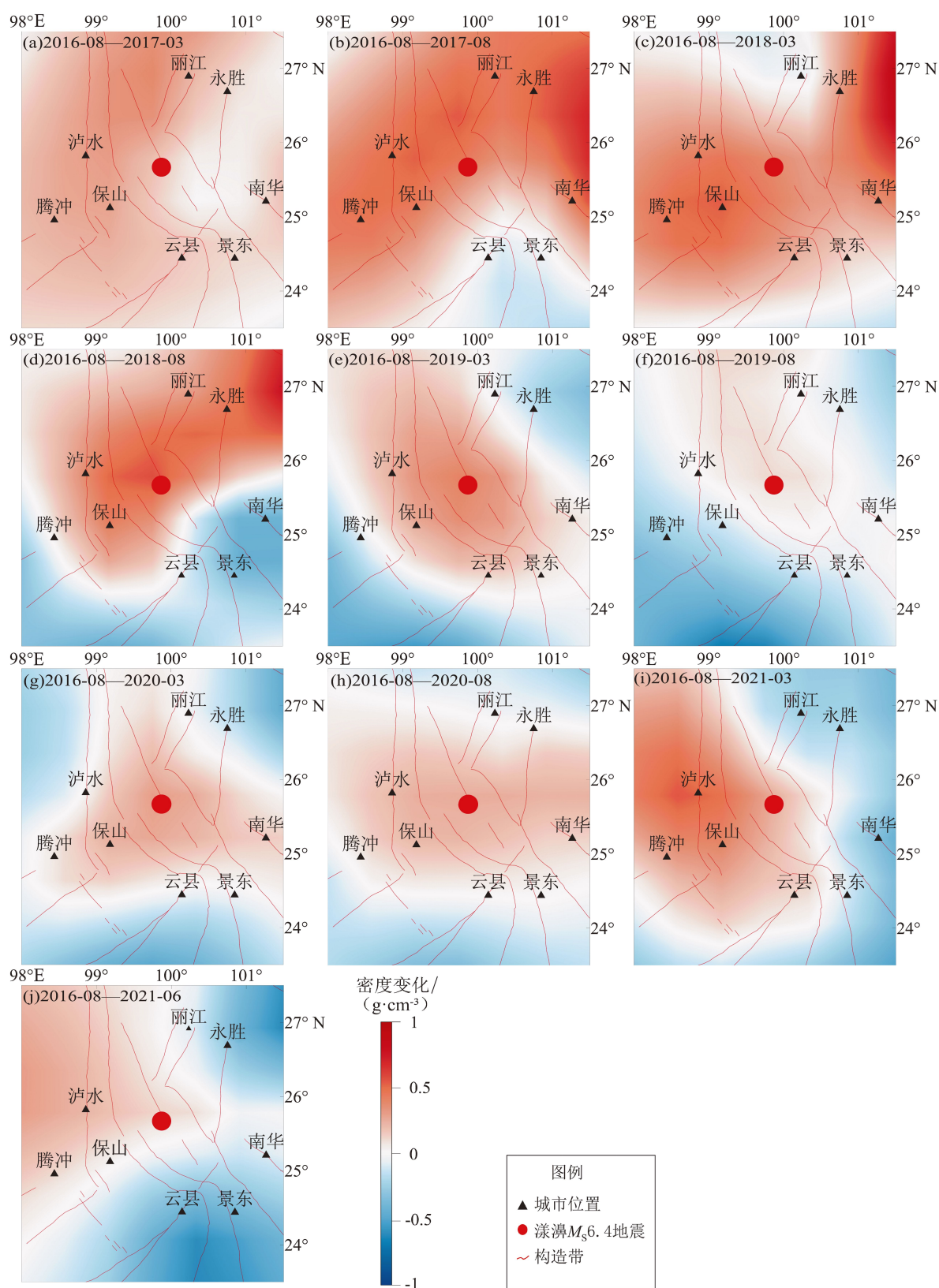


图6 累计重力变化视密度反演结果

Fig. 6 Apparent density inversion of cumulative gravity changes



演化过程,震中附近出现了孤岛式的正变化(图 6e),且正负变化已经与构造基本平行(图 6f),根据以往震例经验(祝意青等,2018;胡敏章等,2019),此时已经为发震窗口期。但是在 2020 年(图 6g~h),孕震区域出现一个平静期(黄江培,2022),视密度弱变化可能意味着震区地壳已经进入“固化”状态(胡敏章等,2021);在 2021 年上半年(图 6i)西北侧出现视密度局部增大,随后发震,发震时间比重力学者的预期推迟了一年,进一步说明了孕震的复杂性。

### 3 讨论

由于地球的不可入性,人们对孕震环境及发震机制一直缺乏共识,而且在地壳内部构造运动引起地表对应变化之前,很多观测手段在地表进行,无法获取内部变化数据。重力场源于万有引力,在地表无明显变化之前的重力场变化,可以理解为孕震区域介质密度的变化效应(申重阳等,2011),所以,在多种观测手段中,重力观测具有能够较早发现异常并提前追踪的优点,对地震中长期预判具有优势。针对本文发现的问题,进行以下几点讨论:

(1) 从 2021 年漾濞 6.4 级地震平均时变距来看(图 6a~c),震中到 2 个重力正变化中心的平均距离约为 110 km,异常范围为时变距的 2 倍,与前人给出的异常指标一致(胡敏章等,2019);但在 200 km 半径范围内的重力变化主要表征震前重力异常(图 3),影响范围约为时变距 4 倍。原始数据异常量值基本在  $\pm 40 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ (图 2),正负差异只有在 2018-08 测期达到统计指标,其余测期均远小于该值。在该震例中,如果采用经验范围指标划定孕震区域,会对整个孕震演化过程造成空间趋势的损失,且孕震过程中只有个别变化极值达到了经验异常量级指标。所以笔者认为,时变距对震级的预判较为准确,但在震例空间演化特征分析时,应该酌情增大异常范围;而在使用异常量级指标进行地震预判时,应该考虑地区差异。

(2) 从图 3 重力变化均值的演化趋势变化来看,漾濞地震前经历了 2 次重力上升—下降的过程,第二次上升—下降变化量级小于第一次,地

震发生于第二次下降阶段,震后转为上升,且地震发生时,区域内重力场总体变化已经小于起变时刻。如果重力场变化是由孕震区域介质密度改变(包括密实度改变及物质运移)引起,发震时刻孕震区域的平均密度小于孕震异常起始阶段,是否可以理解为外部物质入侵(或外部挤压)效能已经全部释放?如果该想法成立,传统地震成因理论都无法对此进行较好的解释。

(3) 结合图 4 和图 6 的重力变化空间演化特征发现,地震并未发生于正负变化极值区域,而是发生于 2 个正变化极值中间位置,并且在整个演化过程中,震中一直处于正变化区域。是否可以理解为震中附近的可塑性要小于周围区域,在孕震过程中一直处于“闭锁”状态,当重力场正负变化边界与地质构造走势一致时,突然“解锁”从而发生地震?孕震过程中重力场的变化机制具有复杂性,对其进一步的研究,尚需要更多的震例分析结果支撑。

### 4 结论

本文通过分析 2021 年 5 月 21 日漾濞 6.4 级地震孕震过程中重构重力场的总体变化趋势,并反演孕震区域视密度演变特征,主要得出以下结论:

(1) 该地震重力异常持续了 4 年之久,且剧烈变化发生于 2017—2018 年,2019—2020 年变化相对平稳,与前人研究结果一致。地震发生于重力下降阶段,滇西地区历史上发生的其他地震也有相同的变化特征。

(2) 观测数据经过时空平滑重构后,在不改变总体变化趋势的情况下,数据离散程度得到有效压缩,标准差从  $17.86 \times 10^{-8}$  降到  $8.99 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,并有限压制高频信号和局部噪声,最大值从  $66.28 \times 10^{-8}$  降到  $27.70 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,最小值从  $-74.20 \times 10^{-8}$  升到  $-21.79 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ,孕震区域内相对重力时空演化趋势更加连续,具有更高的辨识度。

(3) 通过视密度变化反演,能够较好地揭示孕震过程中地下物质运移过程。从漾濞地震视密度反演结果来看,有一个明显的 NW—SE 的物质迁移过程,在经过震中位置后逐渐收缩,在震中位置形成一个“孤岛”形态;孕震过程中正负变



化分界线从 SW – NE 向转为 NW – SE 向, 在分界线与构造走向一致后随即发震, 可对未来地震预判提供一个震例参考。

感谢 GEOIST 开源 Python 软件包 (<https://github.com/igp-gravity/geoist>) 为本文模型测试和反演提供支持。

## 参考文献:

- 陈运泰, 顾浩鼎, 卢造勋. 1980. 1975 年海城地震与 1976 年唐山地震前后的重力变化[J]. 地震学报, 2(1): 21 – 31.
- Chen Y T, Gu H D, Lu Z X. 1980. Variation of the gravity before and after the Haicheng earthquake, 1975 and the Tangshan earthquake, 1976 [J]. Acta Seismologica Sinica, 2(1): 21 – 31. (in Chinese)
- 胡敏章, 郝洪涛, 韩宇飞, 等. 2021. 2021 年青海玛多  $M_s 7.4$  地震的重力挠曲均衡背景与震前重力变化[J]. 地球物理学报, 64(9): 3135 – 3149.
- Hu M Z, Hao H T, Han Y F, et al. 2021. Gravity flexural isostasy background of the 2021 Madoi (Qinghai)  $M_s 7.4$  earthquake and gravity change before the earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(9): 3135 – 3149. (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  $M_s 6.4$  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 seismogenic meaning before and after Yangbi  $M_s 6.4$  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)
- 李静, 万晓云, 徐铭. 2023. 基于 GRACE 卫星数据和位错模型的 2007 年印尼尼古鲁  $M_w 8.4$  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. 2023. Comparative analysis of the coseismic gravity gradient signals of the 2007 Bengkulu, Indonesia  $M_w 8.4$  earthquake based on GRACE satellite data and the dislocation model[J]. Journal of Seismological Research, 46(4): 521 – 528. (in Chinese)
- 刘代芹, 陈石, 王晓强, 等. 2021. 伽师 6.4 级地震前后震源区视密度变化及其构造意义[J]. 地震地质, 43(2): 311 – 328.
- Liu D Q, Chen S, Wang X Q, et al. 2021. The apparent density variation of the focal area before and after Jiashi  $M_s 6.4$  earthquake and its tectonic significance[J]. Seismology and Geology, 43(2): 311 – 328. (in Chinese)
- 申重阳, 谈洪波, 郝洪涛, 等. 2011. 2009 年姚安  $M_s 6.0$  地震重力场前兆变化机理[J]. 大地测量与地球动力学, 31(2): 17 – 22.
- Shen C Y, Tan H B, Hao H T, et al. 2011. Mechanism of precursory gravity change before Yao'an  $M_s 6.0$  earthquake in 2009 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 31(2): 17 – 22. (in Chinese)
- 王林海, 陈石, 庄建仓, 等. 2020. 精密重力测量中相对重力仪格值系数的贝叶斯估计方法[J]. 测绘学报, 49(12): 1543 – 1553.
- Wang L H, Chen S, Zhuang J C, et al. 2020. Bayesian estimation of the scale factor of relative gravimeter in precise gravity survey[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 49(12): 1543 – 1553. (in Chinese)
- 吴桂桔, 于炳飞, 郝洪涛, 等. 2021. 漾濞震区及周缘深部构造特征与发震构造[J]. 地震地质, 43(4): 739 – 756.
- Wu G J, Yu B F, Hao H T, et al. 2021. The deep structural characteristics and the seismogenic structure of the Yangbi earthquake region and its surrounding areas [J]. Seismology and Geology, 43(4): 739 – 756. (in Chinese)
- 徐仁泰. 2023. 基于改进拉普拉斯平滑约束的地震同震滑动分布方法[J]. 测绘地理信息, 48(4): 79 – 83.
- Xu R T. 2023. A coseismic slip distribution inversion method based on improved Laplacian smoothing constraint [J]. Journal of Geomatics, 48(4): 79 – 83. (in Chinese)
- 徐伟民, 陈石, 阮明明, 等. 2021. 川滇地区陆地流动重力测网场源分辨能力评估[J]. 地震, 41(1): 191 – 204.
- Xu W M, Chen S, Ruan M M, et al. 2021. Evaluation of field source resolution of terrestrial mobile gravity network in Sichuan – Yunnan region [J]. Earthquake, 41(1): 191 – 204. (in Chinese)
- 张贝, 陈石, 李红蕾, 等. 2021. 时变重力场球面模型反演算法和模拟实验[J]. 地震, 41(1): 13 – 24.
- Zhang B, Chen S, Li H L, et al. 2021. Time – varying gravity inversion using spherical model and synthetic test [J]. Earthquake, 41(1): 13 – 24. (in Chinese)
- 张展伟, 张纳莉, 杨雅慧, 等. 2023. 基于固定位置插值累加法的重力异常等值线图分析[J]. 华南地震, 43(1): 55 – 60.
- Zhang Z W, Zhang N L, Yang Y H, et al. 2023. Analysis of gravity anomaly contour map based on fixed location interpolation accumulation method [J]. South China Journal of Seismology, 43(1): 55 – 60. (in Chinese)
- 郑秋月, 刘东, 杨薪俊, 等. 2022. 云南流动重力测网数据质量及场源分辨能力评估[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 50(9): 48 – 55.
- Zheng Q Y, Liu D, Yang X J, et al. 2022. Evaluation of data quality and field – source resolution of terrestrial mobile gravity network in Yunnan [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 50(9): 48 – 55. (in Chinese)
- 祝意青, 申重阳, 刘芳, 等. 2020. 重力观测地震预测应用研究[J]. 中

- 国地震, 36(4): 708–717.
- Zhu Y Q, Shen C Y, Liu F, *et al.* 2020. Application of earthquake prediction based on gravity observation [J]. *Earthquake Research in China*, 36(4): 708–717. (in Chinese)
- 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 [J]. *大地测量与地球动力学*, 38(5): 441–446.
- Zhu Y Q, Shen C Y, Zhang G Q, *et al.* 2018. Rethinking the development of earthquake monitoring and prediction in mobile gravity [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 38(5): 441–446. (in Chinese)
- Akaike H. 1980. Likelihood and the Bayes procedure [M]//Bernardo J M, DeGroot M H, Lindley D V, *et al.* *Bayesian Statistics*. University Press, Valencia: 143–166.
- Chen S, Liu M, Xing L L, *et al.* 2016. Gravity increase before the 2015  $M_w$  7.8 Nepal earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 43(1): 111–117.
- Heck B, Seitz K. 2007. A comparison of the tesseroïd, prism and point – mass approaches for mass reductions in gravity field modeling [J]. *Journal of geodesy*, 81(2): 121–136.
- Li Y G, Oldenburg D W. 1998. 3 – D inversion of gravity data [J]. *Geophysics*, 63(1): 109–119.

## Reconstruction of Relative Gravity Data and Inversion of Apparent Density : A Case Study of the 2021 Yangbi $M_s$ 6.4 Earthquake

XU Shengxin, HUANG Jiangpei, ZHENG Qiuyue, CAO Ying, WU Yuqin  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

In response to the possibility of high-frequency signals and local anomalies caused by environmental factors during relative gravity observation, spatio-temporal smoothing constraints are introduced to reconstruct the data change, and then the gravity changes before and after reconstruction is compared. Further, the field source medium is simulated based on a hexahedral model in spherical coordinates, and the apparent density changes of the field source is inverted, to analyze the evolution characteristics of the medium density in the field source area. The results show that after spatio-temporal smoothing reconstruction, the standard deviation of the observed data decreased from  $17.86 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  to  $8.99 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  without changing the overall trend. The range of variation values decreased from  $(-74.20 - 66.28) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$  to  $(-21.79 - 27.70) \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$ ; this effectively compressed the degree of data dispersion and suppressed high – frequency signals and noise in some areas. Thus, the relative gravity spatio-temporal evolution trend in the seismogenic region became more continuous, which facilitated the identification of abnormal features. The change in apparent density in the source area reveals an obvious NW – SE migration process of the underground material. The material gradually contracted after passing through the epicentral area, forming an “island” at the epicenter. During the seismogenic process, the boundary between positive variation and negative variation shifted from SW – NE to NW – SE direction, and earthquakes occurred immediately after the boundary became in line with the structural direction.

**Keywords:** spatio-temporal smoothing; data reconstruction; apparent density; Hexahedron; identifiability; the Yangbi  $M_s$ 6.4 earthquake