

# 南北地震带南段近期重力场变化与指标量分析<sup>\*</sup>

陈兆辉, 王同庆, 刘金钊, 朱传东, 张 品, 张双喜

(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 利用2014—2017年南北地震带南段流动重力观测资料, 基于重力段差值的重力场可视化方法和显著性指标量 $G$ 值和 $C$ 值, 对南北地震带南段重力场变化特征和地震孕育之间的关系做初步的探讨和分析。结果表明: (1) 研究区近期4.5级以上地震多发生在重力场变化的正、负异常过渡带和高梯度带附近, 与深部物质运移的复杂动力学过程、地壳运动和断裂活动具有一定的关系; (2) 指标量 $G$ 值和 $C$ 值作为评价测网重力场变化显著性异常程度的定量依据, 反映了研究区同一时间段内地震活动和未来潜在强震的综合效应, 对于深入判定潜在地震危险性具有一定的参考价值。

**关键词:** 南北地震带; 流动重力; 重力指标量; 重力段差

**中图分类号:** P315.725      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2018)03-0480-07

## 0 引言

南北地震带是中国大陆中部一条贯穿南北的密集地震条带, 汇集了中国大陆五分之二的7级以上强震和一半的8级以上地震, 具有特殊的动力学环境和复杂的孕震构造背景, 长期受到地球物理学家的重视(李善邦, 1957; 王椿镛等, 2015)。南北地震带南段位于青藏高原东南缘, 受印度板块和欧亚板块强烈碰撞挤压导致的青藏高原隆升和高原物质侧向挤出影响(滕吉文等, 1997), 孕育了大量的强震和活动断裂, 成为中国大陆地震活动最强烈、最频繁的地区和开展地震预测预报方法探索最理想的场所之一。

地震是断裂带应力长期累积与突然释放的剧烈地壳运动, 其孕育和发生是一个复杂的物理过程(江在森等, 2009; M7 专项工作组, 2012; 周海涛等, 2017)。在地震的孕育和发生过程中, 伴随着地下深处物质变化和变形过程, 导致区域重力场发生一定程度的变化(陈运泰等, 1980; 祝意青等, 2009; 申重阳等, 2009; 王同庆等, 2017; 张永奇等, 2017)。随着重力观测精度的提高以及观测技术的发展, 通过流动重力测量获得

区域重力场的时空演化过程, 反映与地下深部介质变化及孕震过程相关的地球物理信息, 综合理解地震孕育和发生的物理过程, 对当前的地震科学研究和防震减灾工作具有重要的意义(陈石等, 2011; 胡敏章等, 2015)。以往对区域重力场动态变化过程的研究, 多以定性方法来分析, 缺乏对重力场随时间的变化量与测量误差的对比分析以及对区域重力场变化显著性程度的定量描述, 所揭示的重力场变化信息不够客观和全面。本文利用南北地震带南段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, 通过基于重力段差值的重力场可视化方法和显著性指标量, 讨论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。

## 1 数据资料和方法

### 1.1 数据资料来源

本文的研究区域位于南北地震带南段( $21^{\circ} \sim 29.5^{\circ}\text{N}$ ,  $98^{\circ} \sim 108^{\circ}\text{E}$ ) (图1), 主要断裂包括红河断裂、大凉山断裂、小江断裂、则木河断裂、安宁河断裂、南汀河断裂和丽江—小金河断裂带等(邓起东等, 2002; 张培震等, 2003), 2000年以来相继发生了姚安 M6.5、普洱 M6.4、鲁甸

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2018-04-13.

基金项目: 中国地震局“监测、预报、科研”三结合课题(CEA-JC/3JH-173701)、中国地震局震情跟踪课题(2018010209、2018010212)和国家自然科学基金(41704084)联合资助。

M6.5 和景谷 M6.6 等强震。2013 年中国地震局对整个南北地震带重力监测网进行优化改造, 本文利用研究区优化改造完之后的 2014 年 3 月至 2017 年 9 月之间的 8 期流动重力测量资料, 相对重力观测由中国地震局第一监测中心和云南省地震局联合实施, 绝对重力由中国地震局地震研究所观测。

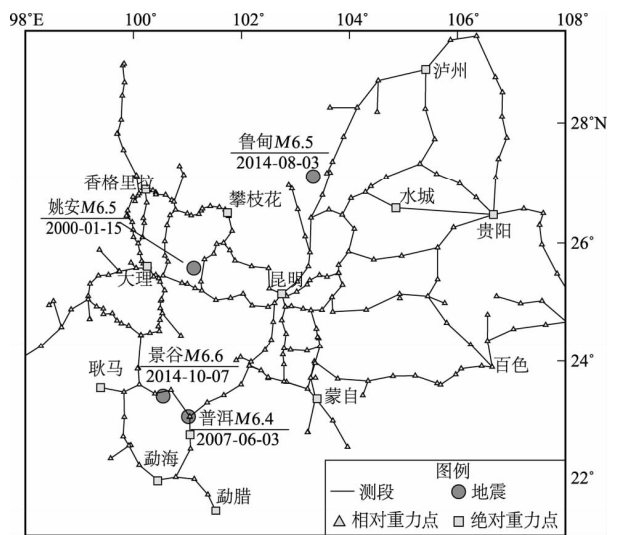


图 1 研究区重力网分布图

Fig. 1 Map showing the distribution of gravity observation network in the study area

1.2 数据处理方法

重力资料平差计算处理: (1) 平差计算利用中国地震局实用化攻关推广的应用软件 LGADJ (刘绍府, 刘冬至, 1991) 进行, 以研究区同步观测的绝对重力点的观测值作为起算基准进行经典平差; (2) 对各期观测数据进行整体平差分析,

在了解各台仪器的观测精度后, 合理分配先验方差, 再重新平差计算, 从而得到最佳解算结果 (祝意青等, 2013); (3) 剔除点位稳定性差、环境变化大及其他信噪比低的测点。

重力段差值、段差变化量和测量误差的关系以及显著的指标量  $G$  和  $C$  的计算: (1) 对变化显著大于正常值的测点和测段做初步筛选和剔除; (2) 根据平差结果的重力段差值、段差变化量和测量误差计算指标量  $G$  和  $C$  值, 其中,  $G$  值和  $C$  值作为判断区域重力场变化显著性程度的指标量, 其定义如式 (1), (2) 所示 (李晓一等, 2017)。各期资料的观测时间、仪器型号以及点值平均精度如表 1 所示, 可以看出, 每期相对重力观测资料的精度和可靠性较好, 平差结果显示点值平均精度均优于  $15 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ , 完全具备获得因构造活动及地壳形变等原因引起的重力场非潮汐变化的能力 (孙少安等, 2015)。

$G$  值定义为:

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

式中:  $N$  为有效测段数;  $dg_i$  为第  $i$  个测段的重力变化;  $e_i$  为第  $i$  个测段的观测误差。

$C$  值定义为:

$$C_i = \frac{N_i}{N}, i = 1, 2, 3$$
 (2)

式中:  $N_i$  代表大于  $i$  倍误差的测段数;  $C_i$  为大于  $i$  倍误差变化的测段比例。

表 1 研究区流动重力测量资料情况

Tab. 1 Mobile gravity measurement information of the study area

序号	观测日期	仪器型号	点值平均精度/ ( $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )
1	2014-03	CG5-217、CG5-230、CG5-834、CG5-845、CG5-1169、CG5-1170	9.4
2	2014-09	CG5-217、CG5-230、CG5-834、CG5-845、CG5-1169、CG5-1170	11.0
3	2015-03	CG5-1229、CG5-1235、CG5-834、CG5-845、CG5-1169、CG5-1170	9.3
4	2015-09	CG5-1229、CG5-1235、CG5-1169、CG5-1170	11.5
5	2016-03	CG5-1229、CG5-1235、CG5-1169、CG5-1170	8.9
6	2016-09	CG5-1229、CG5-1235、CG5-1169、CG5-1170	9.0
7	2017-03	CG5-1235、CG5-1427、CG5-1169、CG5-1170	14.8
8	2017-09	CG5-1235、CG5-1427、CG5-1169、CG5-1170	12.7

## 2 区域重力场变化

### 2.1 重力场累积变化特征

为分析研究区较长时段的区域重力场的累积变化特征,本文以2014年3月观测资料为参考基准,计算获得各期相对该基准的区域重力场的累积变化(图2)。由图2可以看出,研究区重力场的累积变化趋势具有较好的一致性,大致以昆明、楚雄、兴义、六盘水为中心形成重力场变化的正异常区域,周缘以重力场变化负异常为主。2015年3月至2017年3月,研究区存在重力场变化幅度和量值逐渐变小的规律性特征,可能表明了研究区在2014年鲁甸M6.5、景谷M6.6强震发生后深部物质调整和能量衰减释放的一个过程。2016

年个旧M4.7、2017年云南漾濞M5.1、昭通M4.9和珙县M4.9等地震大多分布在重力场变化正、负异常的过渡地带(零值线)和梯度带附近,与祝意青等(2013)、申重阳等(2009)、陈石等(2010)认为的强震多发生在重力场变化的正、负异常过渡带和高梯度带附近的观点一致,与深部物质运移的复杂动力学过程、地壳运动和断裂活动具有一定的关系。

### 2.2 差分重力场变化及段差可视化分析

同一季节整年尺度的重力场变化可以较好地规避季节性降雨等因素对区域重力场的影响,反映的区域重力场变化与地壳运动和深部物质分布的关系更为客观和真实。对2014—2017年研究区一年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)。

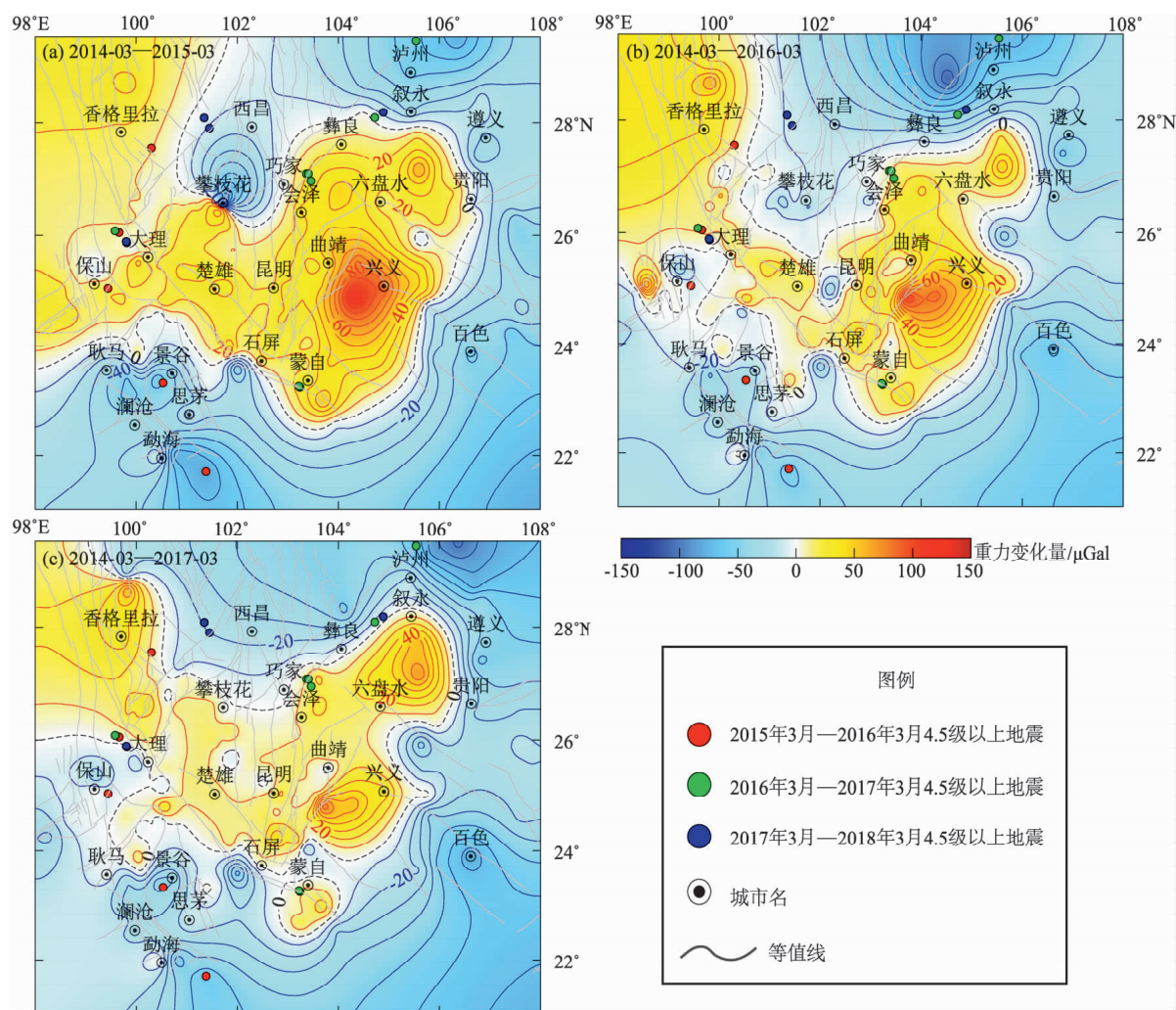


图2 2014—2017年研究区重力场累积变化特征

Fig. 2 Maps showing dynamic patterns of cumulated gravity variation from 2014 to 2017



如图3所示,椭圆的轴长表示相邻2测点重力段差值大小,椭圆与箭头同方向的半轴的长度表示测量误差值大小,箭头的长度代表相邻2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;当箭头在椭圆内部,说明测量误差值大于段差变化值,测量结果包含了较多的误差信息。从图3可以看出,研究区测段整体上以箭头的长度超过椭圆半轴长度为主,表明研究区整体上的段差变化值显著大于测量误差值,说明研究所用的相对重力观测资料的精度和可靠性较好。研究区的边缘地区,由于测点分布较少,多为附和测线,未形成闭合测线,存在部分测段段差变化值小于测量误差值的情况,对

于该区域的重力场变化的分析要更为谨慎。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(李晓一等,2017),尤其在观测数据稀疏区域对于异常的真实性的判定显得更为重要。研究区一年尺度的区域重力场变化随着时间的推移其横向差异趋于平缓,测段段差变化的异常程度也明显降低。由图3a可见,在2014年鲁甸M6.5地震发生后,小江断裂和则木河断裂交汇处测段的段差变化沿着小江断裂整体指南,可能反映了鲁甸地震发生后震源区深部物质沿着小江断裂朝着远离震源区方向运移的动力学过程。图3b, c的段差变化大多集中在 $\pm 20 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ 范围内,箭头指向较为分散和无序,可能与震后物质不断调整的剧烈过程密切相关。

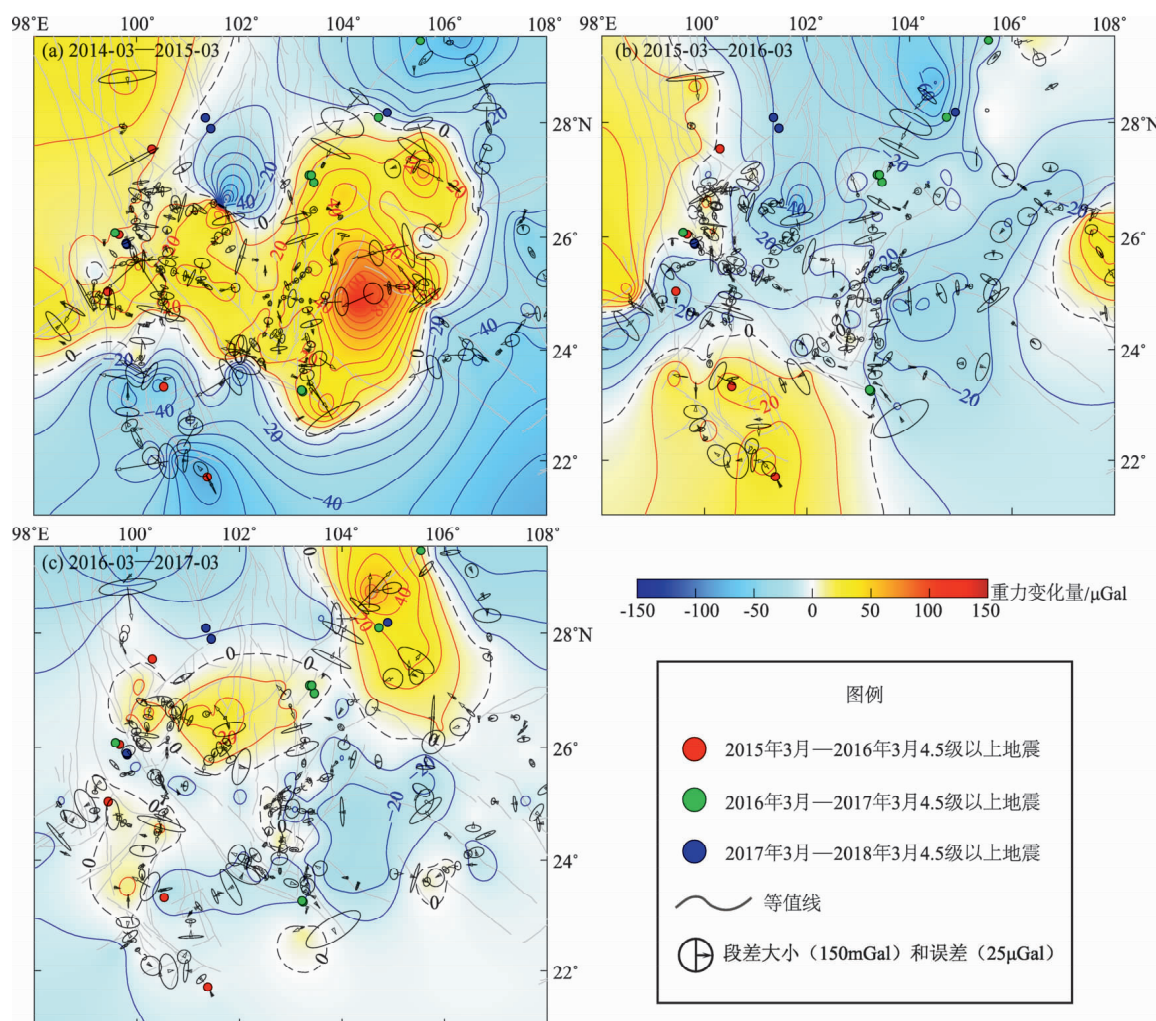


图3 2014—2017年研究区差分重力场变化及段差结果

Fig. 3 Maps of the interannual gravity variations with gravity segment differences from 2014 to 2017

2.3 重力场变化指标量分析

表 2 和图 4 分别给出了 2014—2017 年研究区基于第一期资料一年尺度的重力测段的段差变化、误差情况及段差变化分布结果。可以看出,研究区测段的平均误差在  $7 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  以内,表明观测结果具有较高的可信度。2014—2015 年最大段差变化量以及段差平均变化量呈现最大值,可能与研究区当年活跃的地震活动有关;2015—2016 年有大幅度的降低,2016—2017 年段差变化量又呈现较大幅度的回升。图 4 显示在 2014—2017 年段差变化集中分布  $\pm 40 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$  范围内。

图 5 给出了 2014—2017 年研究区基于第一期资料计算得到的指标量  $G$  和  $C$  值的动态变化趋势,所揭示的研究区测段整体的重力异常程度,可作为评价测网重力场变化显著性异常程度的定量依据。可以看出,研究区  $G$  值和  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  值随时间变化的趋势基本一致,在 2014—2015 年  $G$  值和  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  值最大,2015—2016 年均呈现大幅度的降低,2016—2017 年研究区  $G$  和  $C_1$  有小尺度的回升。图 6 给出了 2014—2017 年研究区地震活动性特征,通过对比分析可以看出,2014—2017 年研究区地震活动性与同一时期的  $G$  值、 $C$  值的变化

规律具有较好的一致性,地震活动性存在与指标量  $G$  值和  $C$  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。李晓一等 (2017) 和王同庆等 (2018) 基于首都圈和青海门源地区的重力场变化研究表明,首都圈和青海门源地区的  $G$  值和  $C$  值在涿鹿  $M4.3$  地震和门源  $M6.4$  地震前存在突然增大的特征,表明  $G$  值和  $C$  值对潜在地震的发生具有较好指示意义。区域重力场的变化反映了地壳运动和地下深部物质运移的过程,在地壳运动和物质运移的复杂动力学作用下,可能在很短的时间内导致中小地震的发生,也有可能处于孕育潜在强震的应变和能量逐渐积累的缓慢过程。因此,重力段差变化指标量所揭示的与地震孕育密切相关的重力场变化的显著性异常程度对潜在地震发生具有较好反映的同时,还与同时期的地震活动具有较好的相关性,是同一时间段地震活动和未来潜在强震的综合反映。如果指标量  $G$  值和  $C$  值显示某地区区域重力场变化显著性异常程度较高,同一时间段内该地区地震活动又较为平静,那么剧烈的重力场变化极有可能表明该地区将有强震发生。

表 2 2014—2017 年重力段差变化统计情况 (单位:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )  
Tab. 2 The statistics of gravity segment difference during 2014 to 2017 (Unit:  $10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ )

日期	最大误差	最小误差	平均误差	最大段差变化量	段差平均变化量
2014—2015 年	18.4	0.51	5.36	80.994	12.62
2015—2016 年	18.61	0.14	5.35	39.993	8.43
2016—2017 年	19.24	0.14	6.01	71.999	9.01

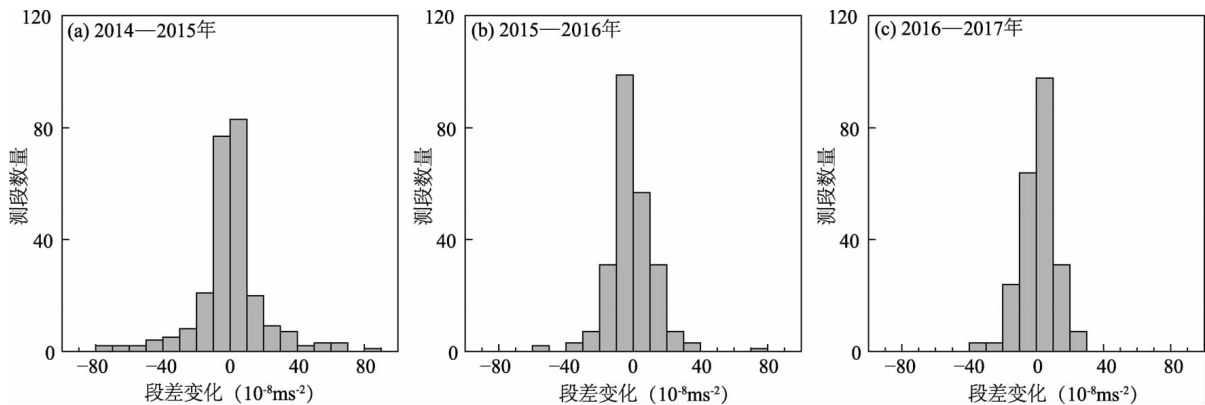


图 4 2014—2017 年研究区段差变化统计特征

Fig. 4 The statistical signatures of one year scale segment difference from 2014 to 2017

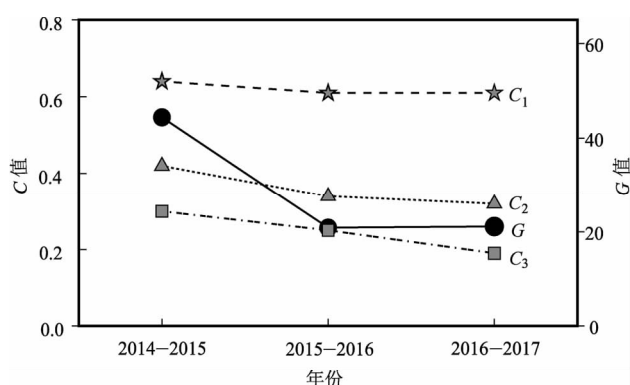


图5 2014—2017年研究区G值和C值变化曲线

Fig. 5 Change trend of G and C value from 2014 to 2017 in study area

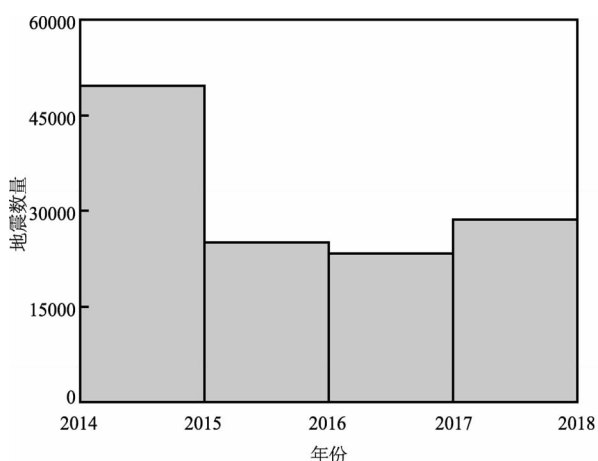


图6 2014—2017年研究区地震活动性

Fig. 6 Seismicity from 2014 to 2017 in study area

### 3 讨论与结论

南北地震带南段作为我国主要的地震危险重点监视区,是开展重力场动态变化与孕震机理研究的理想区域,同时也是验证基于重力段差值的重力场可视化方法和显著性指标量的理想场所。本文利用2014—2017年南北地震带南段的8期流动重力复测资料,基于重力段差值、段差变化量和测量误差的重力场变化可视方法以及显著的指标量G和C,定量与定性分析研究区近期的区域重力场的动态变化特征,对地壳运动及构造活动和地震孕育之间的关系做初步的探讨和分析,取得以下认识:

(1) 研究区重力场的累积变化、差分变化和基于重力段差值的重力场可视化方法结果表明:

在鲁甸和景谷地震发生后研究区重力场变化的幅度降低,横向差异变小,表明研究区在鲁甸和景谷地震后存在深部物质运移调整和能量的释放过程。研究区近期几次4.5级以上地震多发生在重力场变化的正、负异常过渡带和高梯度带附近,与深部物质运移的复杂动力学过程、地壳运动和断裂活动具有一定的关系。

(2) 基于研究区重力段差变化指标量的研究结果表明:与地震孕育密切相关的重力场变化显著性异常是同一时间段地震活动和未来潜在强震的综合效应,如果一段时间内重力场变化显著性异常程度较高,地震活动又较为平静,那么显著的重力场变化极有可能代表了该地区将有强震发生。重力段差变化指标量是评价测网重力变化的显著性异常程度的定量依据,对于深入判定潜在地震危险性具有一定的参考价值。

本刊利用了中国地震局地球物理研究所陈石研究员开发的重力段差可视化程度,云南省地震局形变测量中心王青华和国家重力台网中心为本文提供了部分重力数据,两位审稿专家和编辑老师为本文提出了宝贵的修改意见和建议,在此一并表示衷心感谢。

### 参考文献:

- 陈石,王谦身,祝意青,等. 2011. 汶川  $M_s 8.0$  震前区域重力场变化与震质中研究[J]. 地球物理学进展, 26(4): 1147–1156.
- 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.
- 邓起东,张培震,冉勇康,等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学:地球科学, 32(12): 1020–1030.
- 胡敏章,李辉,刘子维,等. 2015. 川滇地区2010~2013年重力变化及重力网的地震监测能力[J]. 大地测量与地球动力学, 35(4): 616–620.
- 江在森,方颖,武艳强,等. 2009. 汶川8.0级地震前区域地壳运动与变形动态过程[J]. 地球物理学报, 52(2): 505–518.
- 李善邦. 1957. 中国地震区域划分图及其说明[J]. 地球物理学报, 6(2): 127–158.
- 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.
- 刘绍府,刘冬至. 1991. 高精度重力测量平差及其软件[J]. 地震, 11(4): 57–66.
- 申重阳,李辉,孙少安,等. 2009. 重力场动态变化与汶川  $M_s 8.0$  地震孕育过程[J]. 地球物理学报, 52(10): 2547–2557.
- 孙少安,郝洪涛,韦进. 2015. 云南景谷  $M_6.6$  地震前重力场变化的区域性特征[J]. 大地测量与地球动力学, 35(4): 613–615.

- 滕吉文,熊绍柏,张中杰. 1997. 青藏高原深部结构与构造地球物理研究的回顾和展望[J]. 地球物理学报,40(增刊1):121-139.
- 王椿镛,杨文采,吴建平,等. 2015. 南北构造带岩石圈结构与地震的研究[J]. 地球物理学报,58(11):3867-3901.
- 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.
- 王同庆,王树发,杨博,等. 2017. 基于重力和GPS的山西地区形变特征分析[J]. 地震研究,40(1):101-110.
- 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[J]. 中国科学:地球科学,33(增刊1):12-20.
- 张永奇,丁晓光,曹建平,等. 2017. 关中流动重力测网的中小地震映震能力分析[J]. 地震研究,40(2):248-256.
- 周海涛,陈兆辉,朱爽,等. 2017. 川滇地区部分连续GPS测点形变异常分析[J]. 地震研究,40(1):94-100.
- 祝意青,闻学泽,孙和平,等. 2013. 2013年四川芦山 $M_s7.0$ 地震前的重力变化[J]. 地球物理学报,56(6):1887-1894.
- 祝意青,徐云马,吕弋培,等. 2009. 龙门山断裂带重力变化与汶川8.0级地震关系研究[J]. 地球物理学报,52(10):2538-2546.
- M7 专项工作组. 2012. 中国大陆大地震中-长期危险性研究[M]. 北京:地震出版社.

## Analysis of Gravity Field Change and Index Quantity in Southern Part of the South – North Seismic Belt

CHEN Zhaohui, WANG Tongqing, LIU Jinzhao, ZHU Chuandong,  
ZHANG Pin, ZHANG Shuangxi

(The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

### Abstract

By deeply processing the mobile gravity data of the southern part of the South – North Seismic Belt from 2014 to 2017, this paper makes a preliminary discussion and analysis on the relationship between gravity field change and earthquake preparation in the study area with the gravity field visualization method based on the gravity segment difference and the significant index G and C. These results show that (1) the recent earthquakes with  $M_s4.5+$  in the study area always occur near the positive and negative anomalous transition zone and the high gradient zone, which is related to the complex dynamical process of deep matter migration, the crustal movement and the fault activity. (2) The quantity of G and C is useful for quantitative evaluation of the gravity anomaly degree, reflecting the combined effects of seismic activity within the same time period and potential strong earthquakes, which is of great scientific significance for the further determination of potential seismic risk region.

**Keywords:** South – North Seismic Belt; mobile gravity; gravity index; gravity segment difference