

郜怀龙, 李翀, 廖桂金, 等. 粤东地区跨断层形变异常强度特征分析[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 46-55. [GAO Huailong, LI Chong, LIAO Guijin, et al. Analysis on Intensity Characteristics of Cross-fault Deformation Anomaly in Eastern Guangdong[J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 46-55]

粤东地区跨断层形变异常强度特征分析

郜怀龙, 李 翀, 廖桂金, 单和秋

(广东省地震局, 广州 510070)

摘要: 对粤东地区“榕江断裂”和“博美—潮安—三饶断裂”的跨断层形变数据进行整理。在形变趋势累计的基础上, 进一步对形变速率处理方法改进, 解算出跨断层形变异常强度值, 并做归一化处理。将形变异常强度指标引入至流动跨断层测量资料的处理分析中, 应用于跨断层形变曲线的异常辅助识别, 并结合粤东地区震例开展对比研究。分析发现粤东地区地震多发在异常强度高或者由高降低的时段内, 对粤东地区的地震前兆识别有一定指示意义。

关键词: 粤东地区; 跨断层形变; 形变异常强度; 前兆异常

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0046-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.05

Analysis on Intensity Characteristics of Cross-fault Deformation Anomaly in Eastern Guangdong

GAO Huailong, LI Chong, LIAO Guijin, SHAN Heqiu

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

Abstract: The cross-fault deformation data of "Rongjiang fault" and "Bomei-Chao'an-Sanrao fault" in eastern Guangdong were sorted out. On the basis of the cumulative deformation trend, the deformation rate processing method is further improved, and the abnormal intensity value of cross-fault deformation is calculated and normalized. The abnormal intensity index of deformation is introduced into the processing and analysis of flow cross-fault measurement data, which is applied to the abnormal auxiliary identification of cross-fault deformation curve, and the comparative study is carried out with the earthquake cases in eastern Guangdong. It is found that earthquakes in eastern Guangdong occur frequently in the period of high abnormal intensity or decrease from high, which has certain indicative significance for earthquake precursor identification in eastern Guangdong.

Keywords: Eastern Guangdong; Cross-fault deformation; Intensity of deformation anomaly; Precursory anomaly

收稿日期: 2022-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(U1901602); 广东省科技计划项目(2019B020208014); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队项目(99147-42080024)联合资助。

作者简介: 郜怀龙(1988-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 测绘工程精密测量与变形监测方向。

E-mail: 798061889@qq.com

通信作者: 李翀(1993-), 男, 汉族, 硕士, 助理工程师, 研究方向: 地球物理学重力测量方向。

E-mail: 452692262@qq.com

0 引言

跨断层水准测量作为地震监测预报重要手段之一,通过对布设在断裂两侧的控制点进行周期性监测,可以直监测到断层的相对运动情况,粤东地区是我国东南沿海区域新构造运动最强地区之一,孕育有多条深大断裂带,其中布设有跨断层监测的断裂带包括:榕江大断裂和博美—潮安—三饶断裂。对跨断层监测数据的处理,先后有很多位学者进行了研究,将断层视为刚性块体研究断层的三维运动;构建基于混合回归理论的动态数据处理模型;利用断层位移速率的空间分布特征拟合逼近震源位置^[1-3];使用自适应控制理论分析形变数据,构建慢时变前兆系统结构^[4],以上的各种研究对地震异常前兆的提供了理论依据,对地震的监测预报提供了一定的参考意义。本文在该领域学者研究的基础上,利用跨断层形变异常强度指标,研究提取前兆异常信息,并结合粤东地区实际震例进一步分析,验证了使用跨断层形变异常强度指标辅助识别前兆异常的可行性。

1 研究方法 with 原理

通过绘制跨断层形变异常时空动态演化曲线,以辅助识别地震前兆异常信息。此方法以断层总体的平均变化速率绝对量为基值,根据历年的跨断层水准监测资料计算相对运动速率,以相对运动速率在基值中的占比反映形变异常强度,根据异常强度值绘制出异常时空动态演化曲线^[5-7]。

$$v_i = \frac{\partial y_i}{\partial t_i} \quad (1)$$

首先,断层的相对变化速率是用公式(1)求解, i 为观测量的序列号, y 为断层监测点的位移量, t 为监测的间隔时间, v 是断层位移量与监测间隔时间的偏导数,表示断层形变速率值。

$$\bar{v}_k = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{j,k} \quad (2)$$

$$v'_{j,k} = v_{j,k} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{j,k} \quad (3)$$

该方法用于去整体周期趋势化^[8-10],可以减小环境因素的干扰,能够更真实的反映出断层的相对运动情况。式(1)中先解算相同观测月份(序列号为 k)不同观测年份(序列号为 j)速率 $v'_{j,k}$ 的最或然值,式(3)将每年每月份的速率值 $v_{j,k}$ 减去相应月

份的速率最或然值 \bar{v}_k ,得到总体性去周期值 $v'_{j,k}$,其中 m 为总的观测年份。此方法是借鉴了大地水准面的计算方法,与相邻观测年份同观测周期的数据做差,可以一定程度上消除环境等外界因素对数据的影响。

$$k_i = \frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{j,k}}{v_{j,k} - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m v_{j,k}} \quad (4)$$

解算出总体性去周期值 $v'_{j,k}$ 后,该值与最或然值 \bar{v}_k 比率值,即为异常强度值 k_i ,该值是一个无量纲的量。

$$k'_i = \frac{k_i - k_{\min}}{k_{\max} - k_{\min}} (k'_i \in [0,1]) \quad (5)$$

为统一不同测区间的断层形变异常强度值 k_i ,将该值进一步做归一化处理,得到归一化后的形变异常强度 k'_i , k'_i 的取值由0到1表示异常强度逐渐递增,由式(6)可知当 $k'_i=0$ 时,形变异常强度为零,表示相邻两期断层形变速率相同,断层的活动状态趋于稳定; $k'_i=1$ 时,形变异常强度为最大,表示相邻两期断层形变速率强烈,断层的活动状态趋于增强,预示着前兆异常的生成,有孕育地震形成的可能。

但需要注意的是,形变速率的变化不仅与震中的距离、深度、震级有关,也会受到震前出现的闭锁、微破裂、预滑移和测区降水、日照、气候等的影响,因此需要通过收集断层区域的震例,统计震中位置和震级等信息,绘制出监测区域的震级时序图,与形变异常强度对比分析其相关性,进一步探究形变异常强度诱发地震的规律。

按照以上的研究思路,收集整理粤东地区的跨断层水准测量资料,结合断层运动速率值和形变异常强度值,绘制粤东区域的断层形变异常强度时空演变曲线,结合监测区域中的震级时序曲线图,研究其相关性。粤东地区涉及到的断层监测相关信息见表1。

2 跨断层监测场地情况

本次选用了粤东地区的榕江大断裂和博美—潮安—三饶断裂两处场地为研究对象,其中博美—潮安—三饶断裂贯穿饶平、潮安、普宁陆丰等地,在广东境内陆地部分长达210 km,总体走向北东40°~60°,倾角70°~80°,断裂性质为压扭性,穿行于上三叠—下侏罗统砂页岩及燕山三、

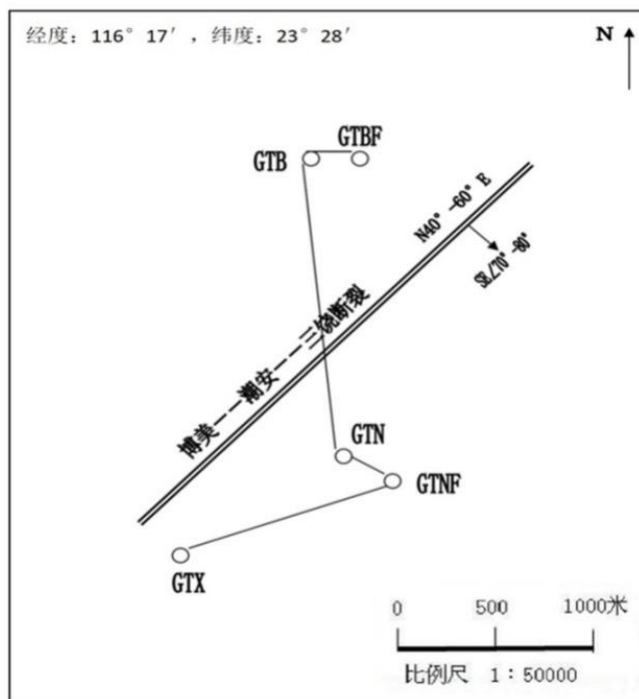


图2 广太跨断层水准测线示意图

Fig.2 Schematic diagram of cross-fault leveling line in Guangtai

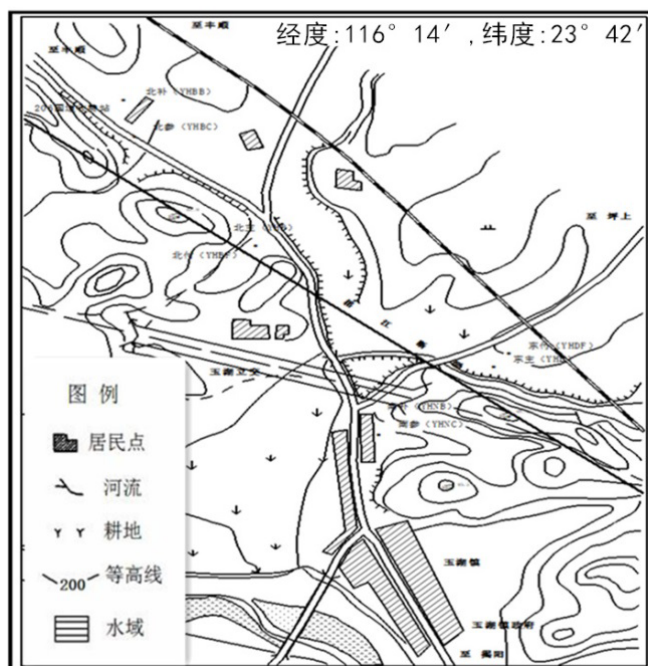


图3 揭阳市玉湖断层水准测量场地

Fig.3 Fault leveling site in Yuhu Town, Jieyang

3 形变异常强度与震例分析

3.1 震例选取

在此次相关震例选择时, 主要选用距离跨断

层监测场地周边 200 km 范围内的地震(图 5), 以确保断层形变异常强度为前兆异常的可靠性^[1]。由于地震诱发的复杂性及远距离强震的影响, 对地震前兆异常的识别带来很大困难, 文中在分析跨断层形变曲线和形变累计曲线的基础上, 研究形

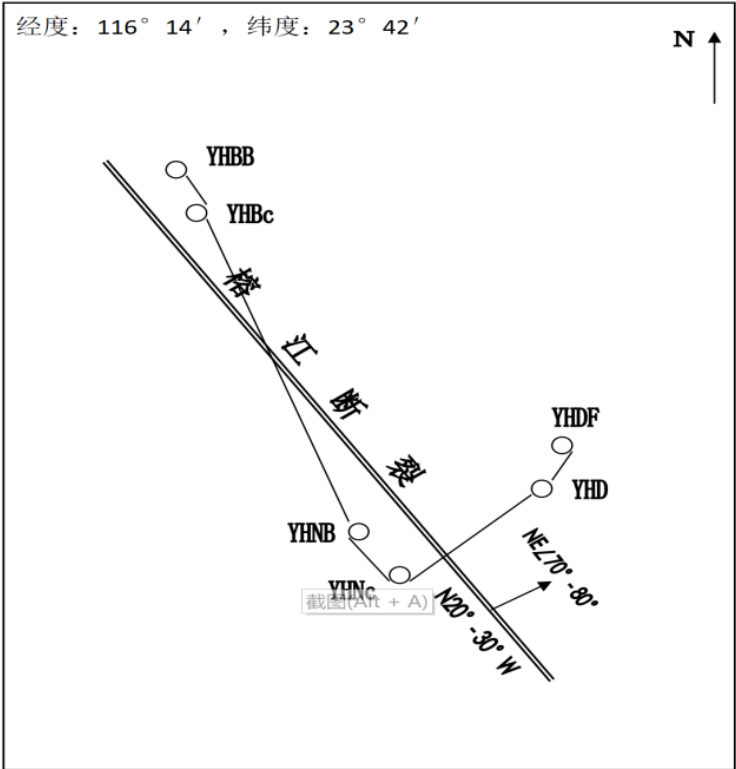


图4 玉湖跨断层水准测线示意图
Fig.4 Schematic diagram of cross-fault leveling line in Yuhu

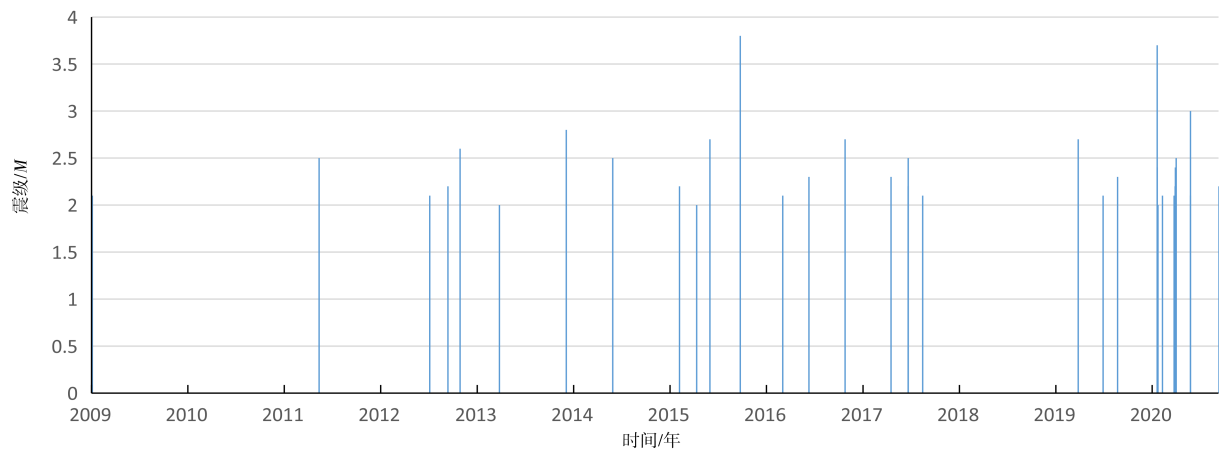


图5 广太、玉湖测区地震时序图
Fig.5 Time sequence diagram of earthquakes in Guangtai and Yuhu survey area

变异常强度和异常强度累计率辅助识别地震异常前兆信息^[12-13]，并进一步探讨其映震规律和相关性。

3.2 博美—潮安—三饶断裂异常强度分析

博美—潮安—三饶断裂共布设水准监测点5个，可用于分析的跨断层测段共有 GTBF-GTN、

GTBF-GTNF、GTBF-GTX、GTB-GTN、GTB-GTNF、GTB-GTX 六个测段，通过对近12年监测数据的对比分析和参照历年的地震趋势会商资料，选取稳定性能良好的测段 GTB-GTN 形变异常强度为研究对象。整理汇总该场地自2009年以来的监测数据，该测段的相邻期变量，与总体累计变量见表2。

表2 广太场地 GTB-GTN 测段数据表
Table 2 Data table of GTB-GTN survey section in Guangtai site

时间/年	相邻期变量/mm						总体累计变量/mm					
2009	0.01	-0.07	0.27	-0.09	0.18	-0.02	0.74	0.67	0.94	0.85	1.03	1.01
2010	1.27	-1.72	0.95	-0.14	0.42	0.20	2.28	0.56	1.51	1.37	1.79	1.99
2011	-0.21	0.01	-0.40	0.21	-0.02	-0.85	1.78	1.79	1.39	1.60	1.58	0.73
2012	0.96	-0.20	-0.28	0.28	-0.40	1.19	1.69	1.49	1.21	1.49	1.09	2.28
2013	-0.15	0.52	-1.52	0.72	-0.28	-0.08	2.13	2.65	1.13	1.85	1.57	1.49
2014	-0.01	0.80	-0.87	0.32	1.15	-0.81	1.48	2.28	1.41	1.73	2.88	2.07
2015	0.77	-0.01	-0.37	-0.22	0.10	1.07	2.84	2.83	2.46	2.24	2.34	3.41
2016	-0.88	-0.44	-0.60	0.90	-0.70	-0.06	2.53	2.09	1.49	2.39	1.69	1.63
2017	0.44	-0.92	0.32	0.17	0.20	-0.06	2.07	1.15	1.47	1.64	1.84	1.78
2018	0.09	1.31	-0.03	-0.54	-1.00	1.31	1.87	3.18	3.15	2.61	1.61	2.92
2019	0.65	-0.48	-0.34	0.17	-0.15	0.70	3.57	3.09	2.75	2.92	2.77	3.47
2020	0.25	0.35	1.36	-0.16	-0.90	-0.14	3.72	4.07	5.43	5.27	4.37	4.23

图6中 GTB-GTN 测段形变曲线为同比临期形变量差值,数据2009年至2018年围绕均值波动,2018年至2021年围绕均值缓慢向上波动,但在2010年、2013年、2021年出现异常波动,其中2010年3月达到异常波动低值-1.72 mm,2013年5月达到异常波动低值-1.52 mm,2021年5月达到异常波动高值1.68 mm;该测段的形变异常强度曲线在2010年3月达到异常高值1.00,2011年至2013年初断层活动较弱,2013年5月达到异常高值0.88,2013年末至2018年初断层活动又转换为相对较弱,2018年3月和11月达到异常高值0.76,2021年5月达到异常高值0.98,表现为2018年后断层运动逐步活跃,形变异常强度所反映的断层活动特征与形变异常波动数据相吻合,说明 GTB-GTN 测段形变异常强度可用于辅助识别形变异常波动特征(图6)。

2013年5月 GTB-GTN 测段形变曲线震荡低值达到-1.52 mm,形变异常强度达到局部高值0.88,异常强度累计率达到局部高值0.3后逐步恢复稳定,反映广太场地在2013年5月份区域应力处于局部活跃高峰值,同年12月份在广东丰顺发生2.8级地震,发生在异常高值的后7个月。

2015年9月广东陆丰发生3.8级地震,广太场地 GTB-GTN 测段形变曲线和形变异常强度曲线未出现明显的异常变化,但按照形变异常强度计算方法,将计算基质替换为形变异常累积值,解算出形变异常强度累计率自2014年中旬出现上升趋势,

2015年9月份达到最高值0.41后转折下降趋势,表明在2015年前后断层活跃度高,且该区域同时段发生过多多次小规模震群,与揭阳地区地震时序图相吻合。

2020年1月广东丰顺发生3.7级地震,广太场地 GTB-GTN 测段形变曲线和形变异常强度曲线呈继承性规律波动,未出现明显波动异常,但该测段形变强度累计率在2019年5月打破原有波动规律,呈震荡上升波动趋势,此次前兆异常出现在地震前7个月。

3.3 榕江大断裂异常强度分析

榕江大断裂共布设水准监测点6个,可用于分析的跨断层测段共有 YHBB-YHNB、YHBB-YHNC、YHBc-YHNB、YHBc-YHNC、YHDF-YHNB、YHDF-YHNC、YHD-YHNB、YHD-YHNC 八个测段,通过对近12年监测数据的对比分析和参照历年的地震趋势会商资料,选取数据完整和稳定的测段 YHNB-YHBc、YHNB-YHD 形变异常强度为研究对象。整理汇总该场地自2009年以来的监测数据,该测段的相邻期变量,与总体累计变量见表3、表4。

YHNB-YHBc 测段形变数据整体呈现规律性的波动变化,在-3~4 mm 周期性震荡,并于每年的第1期达到震荡低值,第4期达到震荡高值,表现为该断层夏季垂直型变量增大,冬季垂直形变量减小的特征;形变异常累计率在2009年至2019年在

小范围内震荡，其中2010年、2019年达到局部的异常高值分别为0.61、0.56，2020年开始加速震荡上升达到0.98的异常高值，表明该测段断层在2010年和2019年附近活动频繁，且2020年开始活动频繁加剧；该测段的均值累计线分别在2011年、2015年、2018年出现低值转折，2013年和2016年出现高值转折，总体在-0.8 mm附近波动，但2020年到达波动低值时，并未出现转折向上震荡，并进一步维持向下震荡趋势，打破了原有的震荡趋势和震荡低值(图7)。

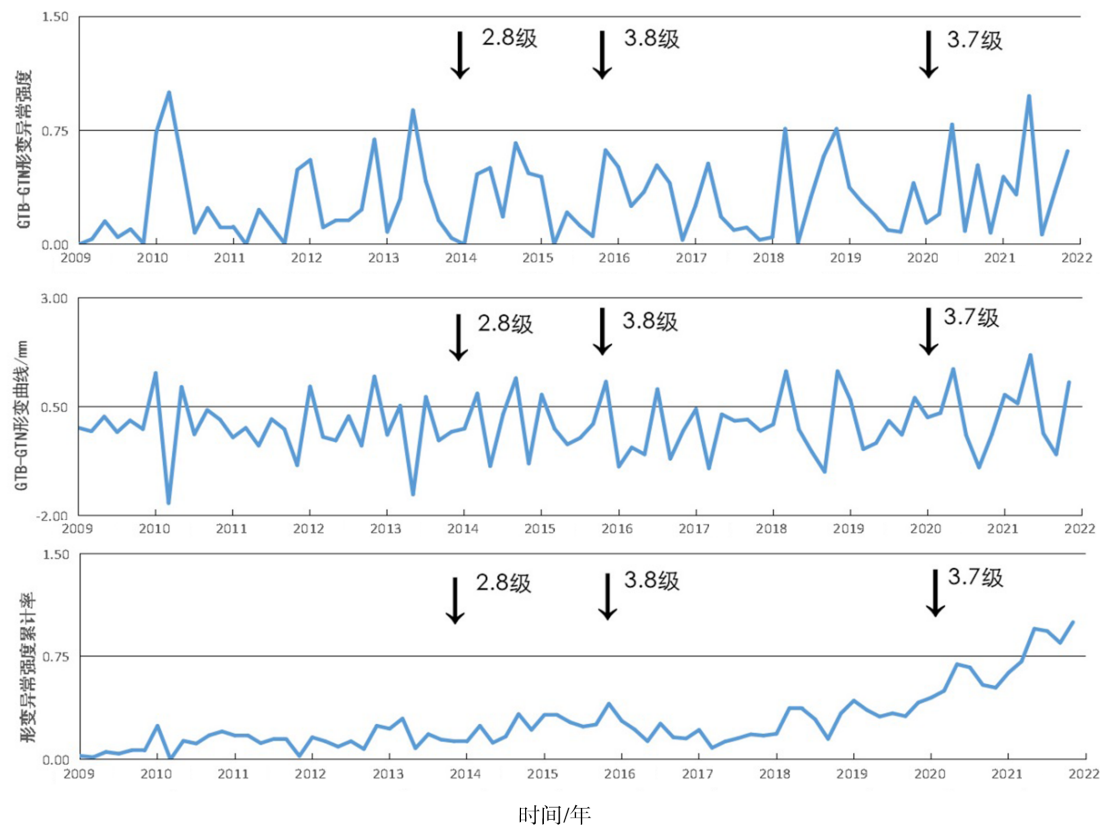


图6 广太场地 GTB-GTN 测段形变数据图

Fig.6 Deformation data map of GTB-GTN survey section in Guangtai site

表3 玉湖场地 YHNB-YHBc 测段数据表

Table 3 Data table of YHNB-YHBc survey section in Yuhu site

时间/年	相邻期变量/mm						总体累计变量/mm					
2009	-2.66	-1.21	0.42	1.98	-0.05	-0.93	-2.17	-3.38	-2.96	-0.98	-1.03	-1.96
2010	-1.89	-0.26	1.74	2.91	0.58	-2.03	-3.85	-4.11	-2.37	0.54	1.12	-0.91
2011	-1.27	-1.80	0.38	2.62	-0.15	0.11	-2.18	-3.98	-3.60	-0.98	-1.13	-1.02
2012	-1.86	-0.07	2.89	1.88	-0.07	-2.64	-2.88	-2.95	-0.06	1.82	1.75	-0.89
2013	-1.07	0.22	2.43	0.80	2.21	-2.94	-1.96	-1.74	0.69	1.49	3.70	0.76
2014	-2.31	-1.11	3.32	0.83	-1.03	-2.88	-1.55	-2.66	0.66	1.49	0.46	-2.42
2015	-0.94	0.64	0.40	2.68	-1.04	-1.34	-3.36	-2.72	-2.32	0.36	-0.68	-2.02
2016	0.73	0.95	0.74	0.88	1.15	-0.93	-1.29	-0.34	0.40	1.28	2.43	1.50
2017	-1.64	-1.02	-0.16	3.33	-1.41	-1.84	-0.14	-1.16	-1.32	2.01	0.60	-1.24
2018	-1.32	-1.78	0.56	3.33	0.38	-1.72	-2.56	-4.34	-3.78	-0.45	-0.07	-1.79
2019	-1.97	2.62	0.76	0.82	-0.20	-2.06	-3.76	-1.14	-0.38	0.44	0.24	-1.82
2020	-0.97	-1.16	0.97	0.06	1.42	-1.62	-2.79	-3.95	-2.98	-2.92	-1.50	-3.12

表4 玉湖场地 YHNB-YHD 测段数据表
Table 4 Data table of YHNB-YHD survey section in Yuhu site

时间/年	相邻期变量/mm						总体累计变量/mm					
2009	-0.31	0.12	-0.49	0.79	-0.34	-0.03	-2.93	-2.81	-3.30	-2.51	-2.85	-2.88
2010	-0.22	-0.03	0.03	0.18	0.10	-0.10	-3.10	-3.13	-3.10	-2.92	-2.82	-2.92
2011	-0.50	0.40	0.39	-0.05	0.20	-0.12	-3.42	-3.02	-2.63	-2.68	-2.48	-2.60
2012	0.41	-0.08	0.06	0.26	-0.01	-0.28	-2.19	-2.27	-2.21	-1.95	-1.96	-2.24
2013	-0.39	-0.03	0.71	-0.37	-0.17	0.23	-2.63	-2.66	-1.95	-2.32	-2.49	-2.26
2014	-0.48	-0.42	0.91	-0.05	-0.44	0.13	-2.74	-3.16	-2.25	-2.30	-2.74	-2.61
2015	0.16	-0.44	0.35	0.36	-0.29	0.13	-2.45	-2.89	-2.54	-2.18	-2.47	-2.34
2016	-0.10	0.36	-0.30	-0.34	0.16	0.21	-2.44	-2.08	-2.38	-2.72	-2.56	-2.35
2017	-0.58	0.23	-0.50	0.49	0.30	0.08	-2.93	-2.70	-3.20	-2.71	-2.41	-2.33
2018	-0.51	-0.10	-0.51	0.97	0.18	-0.22	-2.84	-2.94	-3.45	-2.48	-2.30	-2.52
2019	-0.06	0.08	-0.14	0.40	0.42	0.10	-2.58	-2.50	-2.64	-2.24	-1.82	-1.72
2020	-0.34	-0.68	0.24	1.18	-0.59	0.01	-2.06	-2.74	-2.50	-1.32	-1.91	-1.90

YHNB-YHBc 测段形变曲线在 2013 年附近为显示无特殊变化,但均值累计曲线走势在 2013 年出现转折点,异常强度累计率在 2013 年 9 月出现局部高值达到 0.55,局部异常高值出现在丰顺地震的前 3 个月(图 7)。

2015 年 9 月广东陆丰发生 3.8 级地震,玉湖场地 YHNB-YHBc 测段形变曲线未发生明显异常变化,但形变异常强度累计率出现局部高值,在同年份该测段均值累计出现趋势转折变化。该震例反映出在测段形变异常变化无明显规律时,可通

过形变异常强度和形变异常强度累计率来辅助识别和提取前兆异常(图 7)。

玉湖场地 YHNB-YHBc 测段形变曲线呈现出夏高东低的波动规律,在 2020 年丰顺地震前后波形未显示出明显的异常变化,但形变异常强度累计率在 2018 年下旬和 2019 年 1 月出现了两次震荡高值,表明该断层运动开始增强,并于 12 个月后出现 3.7 级地震,同时该测段均值累计值在 2019 年 9 月打破原波动趋势(图 7)。

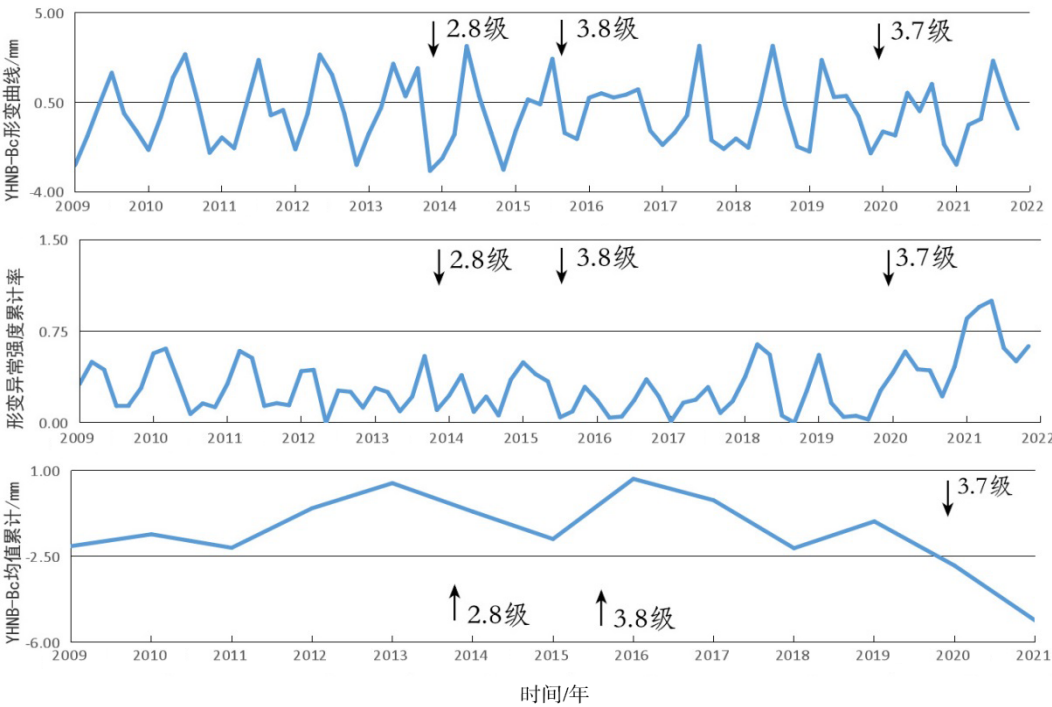


图7 玉湖场地 YHNB-YHBc 测段形变数据图

Fig.7 Deformation data map of YHNB-YHBc survey section in Yuhu site

YHNB-YHD 测段形变数据围绕 0.00 mm 值附近波动,但没有出现明显的季节性波动规律,表明该测段受季节性因素影响较小,但测段在 2011 年 1 月出现局部的震荡低值达到 -0.50 mm, 2013 年 5 月、2014 年 5 月出现震荡高值分别达到 0.71 mm、0.91 mm, 在 2020 年达到震荡低值达到 -2.74 mm; 该测段形变异常强度累计率在 2009 年至 2012 年呈震荡下降趋势, 2013 年 2019 年在 0.45 mm 附近波动, 2019 年至 2020 年由震荡低值突发转变为局部震荡上升, 整体测段上分别在 2011 年 1 月、2013 年、2014 年、2015 年、2020 年出现局的震荡高值, 表明在这几个时间段的断层活动速率增强, 属断

层运动的活跃期, 形变异常强度累计率反映的运动特征部分与测段的形变数据吻合; 测段的均值累计在 2012 年, 2020 年达到波动高值分别为 -2.14 mm、-2.07 mm, 并且在 2011 年打破了原曲线走向趋势(图 8)。

2020 年 1 月广东丰顺发生 3.7 级地震, 同年 1 月 YHNB-YHD 测段均值累计出现高值达 -2.07 mm, 然后转折向下波动, 前兆异常出现在地震异常的前 1 个月时间, 玉湖场地 YHNB-YHBc 测段和 YHNB-YHD 测段异常前兆呈现出一定的相关性, 也再次表明该断层监测场地对地震前兆异常反应的可靠性。

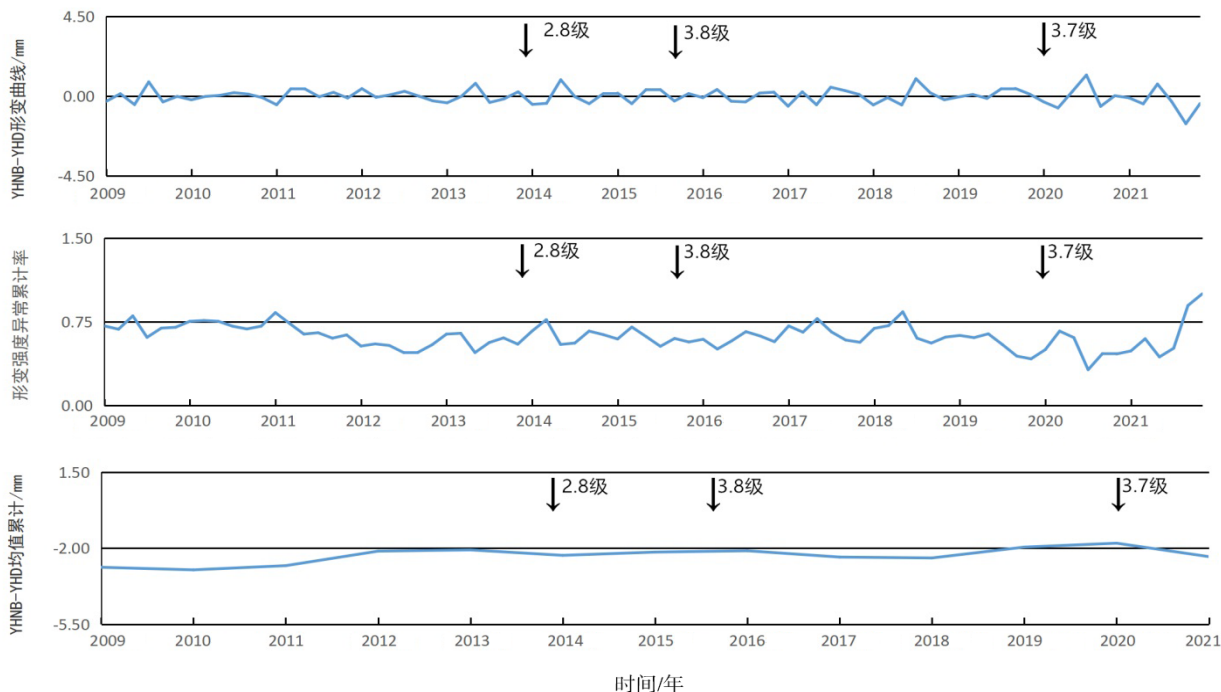


图8 玉湖场地 YHNB-YHD 测段形变数据图

Fig.8 Deformation data map of YHNB-YHD survey section in Yuhu site

4 结论

本文利用断层形变异常强度和断层形变异常强度累计率方法对粤东地区“榕江断裂”和“博美—潮安—三饶断裂”的跨断层形变数据进行研究,并结合断裂附近区域的地震序列分析得出如下结论:

(1)“榕江断裂”和“博美—潮安—三饶断裂”之间的跨断层形变数据、断层形变异常强度、断层形变异常强度累积率和形变均值累积量呈现出一定的相关性,均会在震前 7~18 个月期间出现不同程度的前兆异常,通常前兆异常表现为形变

异常强度波动幅度的增大,形变异常强度和形变异常强度累计率的震荡高值和局部高值,形变均值累积继承性趋势的变化和震荡高低值的趋势转折变化。

(2)榕江大断裂的 YHNB-YHBc 测段形变数据受季节性影响较大,整体呈现夏季高冬低的波动变化,因此该测段前兆异常的判别和提取有一定困难,通过结合对形变异常强度和形变异常强度累计率判读,并利用 YHNB-YHD 测段数据加以佐证,可以一定程度上排除季节变化对形变数据的影响,进一步提高前兆异常的判别和提取的准确性。

(3)粤东地区断层形变异常强度和断层形变异常强度累计率能够很好地反应监测断层的能量聚集程度和断层活跃强度,在断层形变无明显异常时,用于辅助识别提取前兆异常具有一定的可靠性。

参考文献

- [1] 葛计划,宁斌,孙军,等.断层形变异常强度在跨断层水准测量中的应用[J].防灾科技学院学报,2011,13(4):19-24.
- [2] 李杰,唐廷梅,荆强,等.跨断层形变测量异常特征分析[J].地震,2010,30(2):100-110.
- [3] 张超,王世进,王宁,等.垂直形变趋势累计率在川滇地区的应用[J].震灾防御技术,2017,12(2):329-337.
- [4] 贾鹏,张希,路珍,等.利用最小二乘配置识别川滇地区跨断层形变异常的研究[J].大地测量与地球动力学,2016,36(11):972-976.
- [5] 吴少华,程朋根,付博.改进的最优非负变权组合模型及其应用[J].大地测量与地球动力学,2016,36(11):968-971.
- [6] 李福利.宁夏跨断层水准测量资料震前异常指标分析[J].防灾减灾学报,2013,29(3):35-38.
- [7] 陆明勇,于海生,李志雄.华北地区跨断层流动形变监测场地优化初探[J].中国地震,2018,34(4):837-844.
- [8] 王喜龙,杨梦尧,孔祥瑞,等.辽宁朝阳—北票断裂跨断层水准与断层土壤气地球化学特征对比分析[J].大地测量与地球动力学,2021,41(6):600-604.
- [9] 王永江,刘永强,李子涛.辽宁地区跨断层场地水准测量与地震监测预测[J].防灾减灾学报,2011,27(3):50-55.
- [10] 周海涛,薄万举.利用跨断层形变资料求解断层运动及断裂带应变方法研究[J].大地测量与地球动力学,2013,33(6):31-35.
- [11] 郜怀龙,王发胜,禹小军,等.韶关台VS型垂直摆映震效能分析[J].华南地震,2020,40(3):84-91.
- [12] 曹志磊,周琼,葛计划.郟庐断裂带安徽段及“霍山窗”断层活动特征与地震关联性研究[J].大地测量与地球动力学,2019,39(7):681-685.
- [13] 洪敏,张勇,王伶俐,等.跨断层扰动协调比异常提取方法与效能评估及其在云南地区的应用[J].地震研究,2023,46(1):99-106.