

引用格式: 贾丽云, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2023. 1605 年琼山  $M7\frac{1}{2}$  级地震区现今地应力动态变化特征及对东寨港沉陷的指示意义 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 339–354. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232904](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232904)

Citation: JIA L Y, MA X M, JING J J, et al., 2023. Dynamic variation characteristics of in-situ stress in the 1605 Qiongsan  $M7\frac{1}{2}$  earthquake area and its implications to the Dongzhaigang subsidence, northeastern Hainan Island, China [J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 339–354. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232904](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232904)

## 1605 年琼山 $M7\frac{1}{2}$ 级地震区现今地应力动态变化特征及对东寨港沉陷的指示意义

贾丽云<sup>1,2,3</sup>, 马秀敏<sup>1,2,3,4</sup>, 姜景捷<sup>1,2,3</sup>, 雷喆<sup>1,2,5</sup>, 魏永仪<sup>1,2,6</sup>, 毛佳睿<sup>1,2,3</sup>,  
郝飞<sup>1,2,3</sup>

JIA Liyun<sup>1,2,3</sup>, MA Xiumin<sup>1,2,3,4</sup>, JIANG Jingjie<sup>1,2,3</sup>, LEI Zhe<sup>1,2,5</sup>, WEI Yongyi<sup>1,2,6</sup>, MAO Jiarui<sup>1,2,3</sup>, HAO Fei<sup>1,2,3</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站, 北京 100081;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083;
5. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074;
6. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Observation and Research Station of Crustal Stress and Strain in Beijing, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Crustal Stability Assessment, Beijing 100081, China;*
4. *School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*
5. *Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*
6. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

### Dynamic variation characteristics of in-situ stress in the 1605 Qiongsan $M7\frac{1}{2}$ earthquake area and its implications to the Dongzhaigang subsidence, northeastern Hainan Island, China

**Abstract:** Based on the strain data of three in-situ stress monitoring stations in different sections of the 1605 Qiongsan  $M7\frac{1}{2}$  earthquake area, we studied the dynamic variations of in-situ stress and extracted the sudden stress changes recorded by them. We analyzed the in-situ stress variations and tectonic activity between March 2016 and May 2018 to discuss the geomorphological evolution trends and subsidence mechanisms at the Dongzhai Port. The results show that the study area was generally subjected to the NW-compressive stress field, which makes the tensile stress field dominate in the Yanfeng and Dazhipo areas in the hanging wall of the Maniao-Puqian fault(MPF) and the Puqian-qinglan fault(PQF), while the Jinshan area in the footwall of the faults by compressive stress. The MPF fault and the PQF fault have been constantly

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230249, DD20230014); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目 (DZLXS202106, DZLXJK202211); 国家自然科学基金 (42272222); 海南省海洋地质资源与环境重点实验室开放课题 (22-HNHYDZZYHJKF022)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants DD20230249 and DD20230014), Basic Research Funds of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (Grants DZLXS202106 and DZLXJK202211), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42272222), and the Open Project of the Hainan Key Laboratory of Marine Geological Resources and Environment (Grant 22-HNHYDZZYHJKF022)

第一作者: 贾丽云 (1982—), 女, 博士, 副研究员, 从事新构造与活动构造、构造地貌方向研究。E-mail: [158943653@qq.com](mailto:158943653@qq.com)

通讯作者: 马秀敏 (1978—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事地应力与地质工程方向研究。E-mail: [maxiumin2@163.com](mailto:maxiumin2@163.com)

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-25; 责任编辑: 吴芳

engaged in non-seismic activities to adjust the local stress field under the regional stress field, among which the MPF Fault had several activities in March–July 2016, October 2017, and April 2018, and the PQF fault had two activities in October 2017. The energy of the MPF activities is more intensive than that of the PQF. The variation trend of the stress field indicates a gradual upward trend in the east bounded by the MPF fault ( $F_{13.1}$ ) and possible continued subsidence in Dongzhaigang in the west. The fault activity trend implies that the subsidence rate in Yanfeng, the northern part of Dongzhaigang, bounded by the MPF fault ( $F_{2.2}$ ), should be greater than that in the southern Sanjiang area. In addition, the volume strain monitoring data also reveals traces of magmatic activity in the lower part of the N–S seismic zone of Hainan Island. The comprehensive study concluded that the Dongzhaigang subsidence is mainly controlled by the positive fault activity of the MPF and PQF faults due to the upwelling of deep magma and influenced by the Holocene sea level change and the properties of soft soil depositional strata leading to soft soil flow slip, sand liquefaction, and seawater erosion. We innovatively apply the borehole strain observation technology to explore the evolution law and trend of typical earthquake subsidence landforms in coastal zones, which has essential academic value in the fields of in-situ stress monitoring and tectonic geomorphology research, and the results also have significant application value for mangrove protection and urban planning and construction in Dongzhaigang area.

**Keywords:** borehole strain monitoring; dynamic variation of in-situ stress; Qiongsan earthquake; Dongzhaigang subsidence; Geomorphic evolution tendency

**摘要:** 文章利用 1605 年琼山 7½ 级地震区不同区块布设的 3 个地应力监测台站应变观测数据, 进行了地应力动态变化分析并对其记录的应力突变信息进行了提取, 分析了 2016 年 3 月—2018 年 5 月地应力变化与构造活动情况, 并探讨了东寨港地貌演化趋势及其沉陷机理。结果显示: 研究区总体受北西向挤压应力场作用, 使得位于马袅-铺前断裂与铺前-清澜断裂上盘的演丰和大致坡地区以拉张应力场为主, 位于断层下盘的锦山地区以挤压应力场为主; 马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂在区域应力场作用下, 不断进行非震活动来调整局部应力场, 其中, 马袅-铺前断裂在 2016 年 3—7 月、2017 年 10 月和 2018 年 4 月有过多次活动, 铺前-清澜断裂在 2017 年 10 月和 2018 年 4 月有过 2 次活动, 马袅-铺前断裂较铺前-清澜断裂活动能量强; 应力场变化趋势指示以铺前-清澜断裂 ( $F_{13.1}$ ) 为界, 东部有逐步抬升趋势, 西部的东寨港可能还会持续沉降; 断层活动趋势指示以马袅-铺前断裂 ( $F_{2.2}$ ) 为界, 东寨港北部演丰地区的沉降速率应该大于南部三江地区; 此外, 体应变监测数据也指示了位于海南岛南北地震带下部的岩浆活动痕迹。综合研究认为, 东寨港沉陷主要受深部岩浆上涌导致的马袅-铺前断裂与铺前-清澜断裂的正断活动控制, 并受到全新世海平面变化与软土沉积地层性质导致软土流滑、砂土液化以及海水侵蚀等多方面影响。文章创新性的将钻孔应变观测技术应用于探索海岸带地区典型震陷地貌演化规律与趋势研究, 在地应力监测与构造地貌研究领域都有着重要的学术价值, 同时, 该成果对东寨港地区红树林保护、城镇规划建设等方面亦具有重要的应用价值。

**关键词:** 钻孔应变监测; 地应力动态变化; 琼山大地震; 东寨港沉降; 地貌演化趋势

**中图分类号:** P315.72+7; P931 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0339-16

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20232904

## 0 引言

公元 1605 年, 海南岛东北部东寨港地区发生琼山  $M7\frac{1}{2}$  级大地震, 是中国迄今为止唯一有历史地震记载的由地震导致大面积陆陷成海的地区, 沉降幅度达 3~4 m (陈恩民和黄咏茵, 1989), 形成了典型的震后沉陷地貌——东寨港。东寨港地貌的形成, 主要受控于 2 组断裂的活动, 钻探联孔剖面与地层学研究认为东寨港地堑自中新世开始发育, 之后断裂一直在不断的活动导致地堑不断下沉, 直到

1605 年琼山大地震导致的下沉使海水倒灌形成现今的东寨港港湾 (丁莹莹等, 2018; 贾丽云等, 2021)。据光纤位移监测数据显示, 至今东寨港仍在以 1.11~4.66 mm/a 的速率持续沉降 (胡道功等, 2022), 但其沉降机理一直存在争议 (彭承光, 1983; 徐起浩, 1985, 1986a, 1986b, 1986c; 1988; 颜玉定等, 1988; 李珩等, 1988; 陈恩民和黄咏茵, 1989; Xu, 1990) 主要有 3 种观点: 内动力导致的断层活动说 (徐起浩, 1985; 颜玉定等, 1988; 李珩等, 1988)、外动力软土流滑说 (彭承光, 1983; 陈恩民和黄咏茵, 1989) 和震源区相变引起的体积收缩说 (许寿椿等,

1982)。断层活动成因机制观点认为,北西向铺前-清澜断裂倾滑活动是造成东寨港沉降的主因,它不但控制了东寨港地堑的发育,还控制了1605年东寨港陆陷成海以及后期的地壳持续下沉(丁莹莹等,2018);软土流滑观点认为东寨港的沉降主要是由于地震后东寨港的砂土液化流动沉陷所致(彭承光,1983;陈恩民和黄咏茵,1989);而震源区相变引起的体积收缩观点则来自于有限单元法数学模拟结果(许寿椿等,1982)。同时,对于东寨港地区差异沉降趋势的研究也较为缺乏。

地应力是地壳内部产生的内应力效应,而岩石中的地应力是在不断变化的(李方全,1985),这种变化对分析地貌演化的机理来源及其未来活动趋势均有着重要的指示意义。如东寨港的沉降过程中也会引起周围岩体中应力状态的改变,尤其是断层时空活动过程对地堑周缘断层各上、下盘地体的应力有着不同的响应。国内外钻孔应变监测主要用于观测断层带地应力场变化,并通过模拟计算为地震预报提供资料(蒋靖祥等,2003; West et al., 2005; 邱泽华等,2006; 朱航,2008; 秦向辉等,2018; 谭成轩等,2019; 孟秋等,2021),但将应变监测数据用于地貌演化分析的案例还不多见。

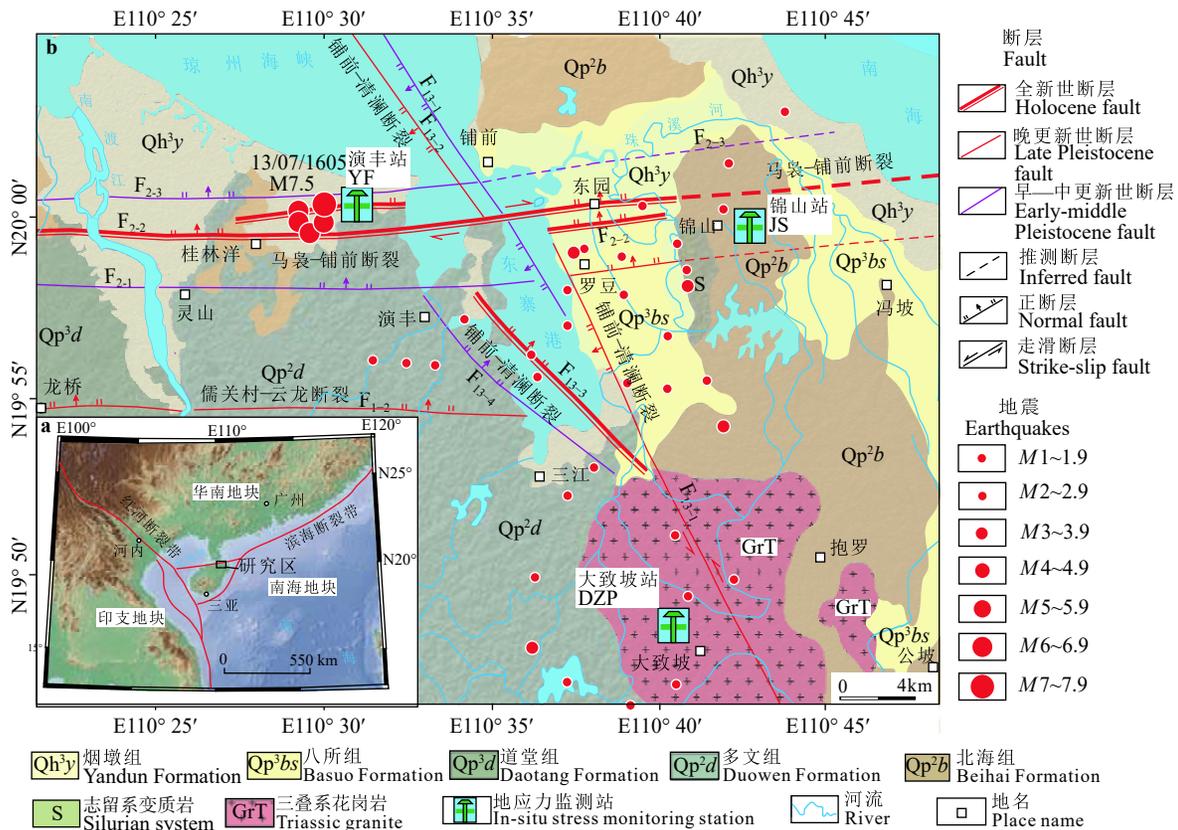
地貌演化主要受到地球内外动力联合作用的控制和影响,内动力主要包括板块运动、断层与火山活动等,外动力作用主要有地表侵蚀、搬运、堆积以及风、温度、湿度变化等(杨景春和李有利,2005; 伍光,2008),钻孔应变数据可以灵敏的捕捉到高于 $1 \times 10^{-11} \epsilon$ 的地应力变化信息,其监测数据记录了地貌演化过程中应力场细微的变化特征,同样也可以结合地貌演化历史规律,利用应变数据的动态变化趋势推测地貌演化趋势。文章通过分析在1605年琼山M7½级地震区布设在马袅-铺前断裂(近东西走向)与铺前-清澜断裂(北西走向)的3个地应力台站所监测的连续地应力数据及其动态变化特征,探索研究海岸带地区典型震陷地貌演化规律与趋势。这不仅在地应力监测与构造地貌研究领域都有着重要的学术价值,同时对东寨港地区红树林保护、城镇规划建设等方面提供了重要数据,亦具有重要的应用价值。

## 1 地质地貌概况

东寨港处于南海陆缘北部断裂地震带,华南板

块、印支板块和菲律宾板块的交界部位(图1),新生代以来,在板块间相互作用和深部岩浆活动的背景下,构造活动非常活跃,活动断裂和第四纪火山广泛发育。1605年发生M7½级大地震,震中位于东寨港西北部的塔市附近(19.9N; 110.5E)。极震区烈度达IX度,并于同年发生4次6级以上强余震,已有研究认为该次大震主要发震断层为北东东走向的北倾正断层——马袅-铺前断裂(王超群等,2022),此次地震活动导致该区附近的断层发生剧烈活动,造成东寨河及其沿岸约100 km<sup>2</sup>陆陷成海,沉降幅度3~4 m(陈恩民和黄咏茵,1989),形成了现今的东寨港震陷地貌,整体呈“V”型,港湾内部现多个小型陆地岛屿和大曲率的港湾海岸,北部经北创岛东西两侧与琼州海峡相通。

现今沉陷区与东寨港小型地堑基本重合,南部为地势平坦的三江河平原,主要为全新世河流沉积;平原南部为大致坡丘陵地貌,海拔约20 m,主要分布三叠系花岗岩(GrT);东寨港西岸为火山岩台地,地层为中更新统多文组(Qp<sup>2d</sup>)玄武岩,上部有1~2 m红色黏土风化壳;港湾东部为东寨港潟湖平原,主要地层为上更新统八所组(Qp<sup>3bs</sup>),其中珠溪河沿东西走向切穿中更新统北海组(Qp<sup>2b</sup>)地层,将东侧高地分割为北部的铺前半岛与锦山台地,并沉积了全新世晚期的烟墩组(Qh<sup>3y</sup>)地层;东寨港西北部与琼州海峡南岸的南渡江三角洲相连。此外,钻孔岩芯中还可见全新统琼山组(Qh<sup>2q</sup>)、下更新统秀英组(Qp<sup>1x</sup>)、上新统海口组(N<sub>2</sub>h)、中新统角尾组(N<sub>1</sub>j)与灯楼角组(N<sub>1</sub>d)、志留系变质岩(S)等地层。而东寨港小型地堑在构造地貌上属于新生代地堑盆地,被一组北西走向的铺前-清澜断裂与近东西走向的马袅-铺前断裂所围陷(图1),铺前-清澜断裂由东(F<sub>13-1</sub>、F<sub>13-2</sub>)、西(F<sub>13-3</sub>、F<sub>13-4</sub>)2支共4条断层组成,被认为是控制东寨港地堑形成的主要断裂(丁莹莹等,2018),其中,F<sub>13-1</sub>南段切穿罗豆农场的最新地层为上更新统八所组(Qp<sup>3bs</sup>),是晚更新世活动断层;F<sub>13-3</sub>为全新世活动断层(王超群等,2022);最新研究结果表明,近东西向的马袅-铺前断裂由3条北东东向平行展布的北倾正断层组成,分别为马村-罗豆断层(F<sub>2-1</sub>)、海秀-东园断层(F<sub>2-2</sub>)和长流-珠溪河断层(F<sub>2-3</sub>),该断裂陆域全长约132 km,呈隐伏-半隐伏状态,总体表现为正断性质,局部兼右旋走滑;其中F<sub>2-1</sub>最新活动时代为早一



a—南海西北部活动构造图；b—东寨港地区地质地貌与地应力台站分布图

图1 东寨港地区地质地貌与地应力台站分布图(底图据王超群等, 2022 修改)

Fig. 1 Distribution of geological landforms and in-situ stress monitoring stations in the Dongzhaigang area (Base map modified from Wang et al., 2022)

(a) Active tectonic map of the northwestern South China Sea; (b) Distribution of the geological landforms and in-situ stress monitoring stations in the Dongzhaigang area

中更新世;  $F_{2,2}$  最新活动时代为全新世, 被认为是琼山  $M7\frac{1}{2}$  级地震的发震断裂;  $F_{2,3}$  最新活动时代为早一中更新世(刘华国等, 2018; 李薇等, 2019; Wang et al., 2021; 胡道功等, 2022; 王超群等, 2022)。

## 2 数据采集与处理方法

### 2.1 台网布设与监测仪器

东寨港地应力观测区域网由演丰台站(YF)、锦山台站(JS)和大致坡台站(DZP)3个台站组成(图1), 其中, YF台站位于1605年琼山大地震震中的塔市附近, 处于马袅-铺前断裂( $F_{2,2}$ )上盘, 观测仪器安装深度约57 m, 岩性为贝壳碎屑岩; JS台站位于东寨港东部的锦山台地, 处于马袅-铺前断裂( $F_{2,2}$ )下盘和铺前-清澜断裂( $F_{13,1}$ )下盘的交汇部位, 安装深度约89 m, 岩性为花岗岩; DZP台站位于东寨港南部的丘陵地带, 处于铺前-清澜断裂( $F_{13,1}$ )上盘, 安装

深度约65 m, 岩性为花岗岩。

监测仪器采用中国地质科学院地质力学研究所研发的TY-2B型体应变仪(图2; 彭华等, 2019), 仪器总长1300 mm, 直径 $\Phi 89$  mm, 其中工作舱段长500 mm, 工作体积2576.5 mL, 灵敏度优于 $1 \times 10^{-11} \epsilon$ , 具有清晰观测同震应变阶和固体潮的能力。探头内部安装有热标定装置, 以产生恒定的体应变来标定观测系统(彭华等, 2006, 2008, 2011)。

### 2.2 数据采集与质量分析

2016—2018年, 东寨港地应力观测区域网累计获取体应变观测数据17.31 GB。3个台站的数据采集日期、观测数据量及数据采集率详见表1。

连续应变观测数据可靠性评价是数据应用的前提条件。目前, 同震应变阶、固体潮( $10^{-8} \epsilon$ )的应变变化特征是判断应变观测数据质量的主要标准(邱泽华等, 2004), 通过3个台站的同震应变阶、固

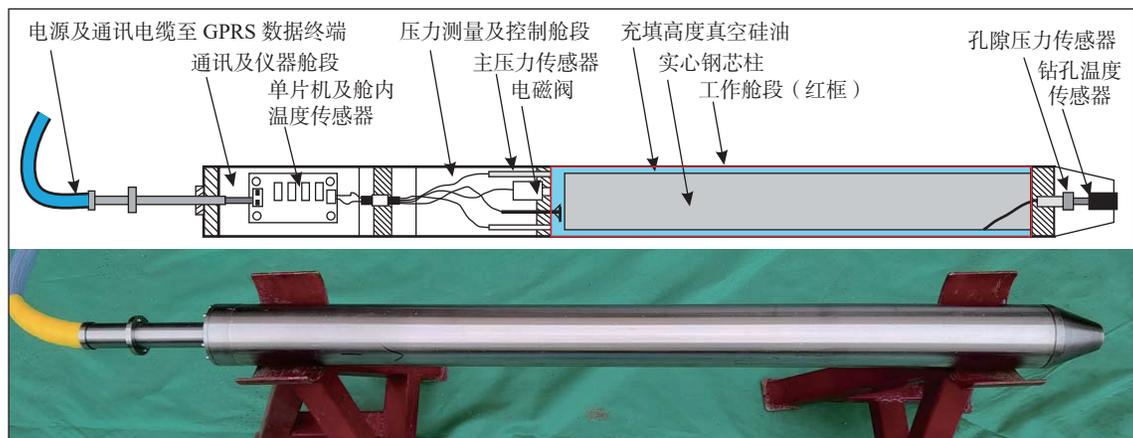


图 2 体应变仪结构与外观  
Fig. 2 Structure and appearance of the volume strainmeter

表 1 东寨港地区地应力监测数据参数表  
Table 1 Parameter table of in-situ stress monitoring data in the Dongzhaigang area

台站名称	采集日期	数据量/GB	采集率/%	采集频率/Hz
JS台站	2016.02-2018.06	5.51	96.6	10
DZP台站	2016.02-2018.05	4.82	87.0	10
YF台站	2016.02-2019.02	6.98	91.7	10

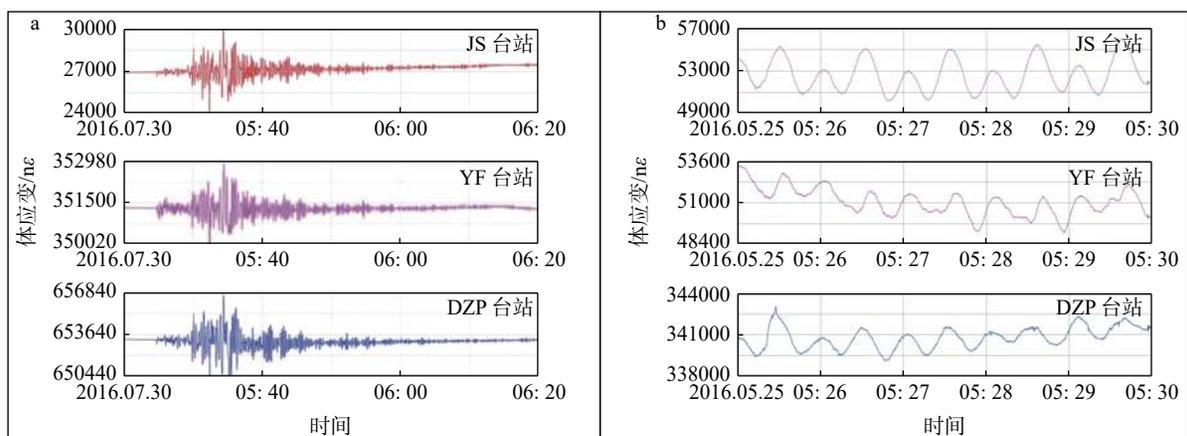
体潮观测能力对比, 可知 3 个台站同时记录到同震引起的应变变化曲线和固体潮曲线, 且特征形态极其相似 (图 3), 证明上述台站观测数据质量较好、可靠性较强。

### 2.3 数据处理与信息提取

利用钻孔应变仪观测地下的应变变化, 是一种了解地应力动态变化的重要方法 (邱泽华, 2010)。地应力变化的影响因素有很多, 主要包括构造运

动、气压、水位、人工干扰等等, 因此, 从海量的应变监测数据中提取构造活动信息, 需要从多角度、多学科知识进行综合分析, 尽可能的排除非构造活动对应变变化的影响, 提取构造活动应变曲线特征信息。

此次数据处理采用地质力学所自主研发的“地应力监测数据处理软件”, 按时间、分台站处理应变观测数据。具体过程为: 首先, 将采集的整体数据经过原始观测数据存放与导入, 根据同震、固体潮应变阶进行校正, 仪器耦合剂引起的应变异常部分删除; 然后, 再利用软件自动获取各种应变异常数据幅度值 (或应变变化值); 最后, 将应变异常信息对照事件样本库进行详细对比分析, 以提取构造活动事件。然而, 在众多的应变异常信息中提取构造活动事件并排除相关的应变干扰信息非常关键。该期数据主要干扰影响因素为台风、潮汐和仪器自耦过程等等。其中台风对应变值的影响主要

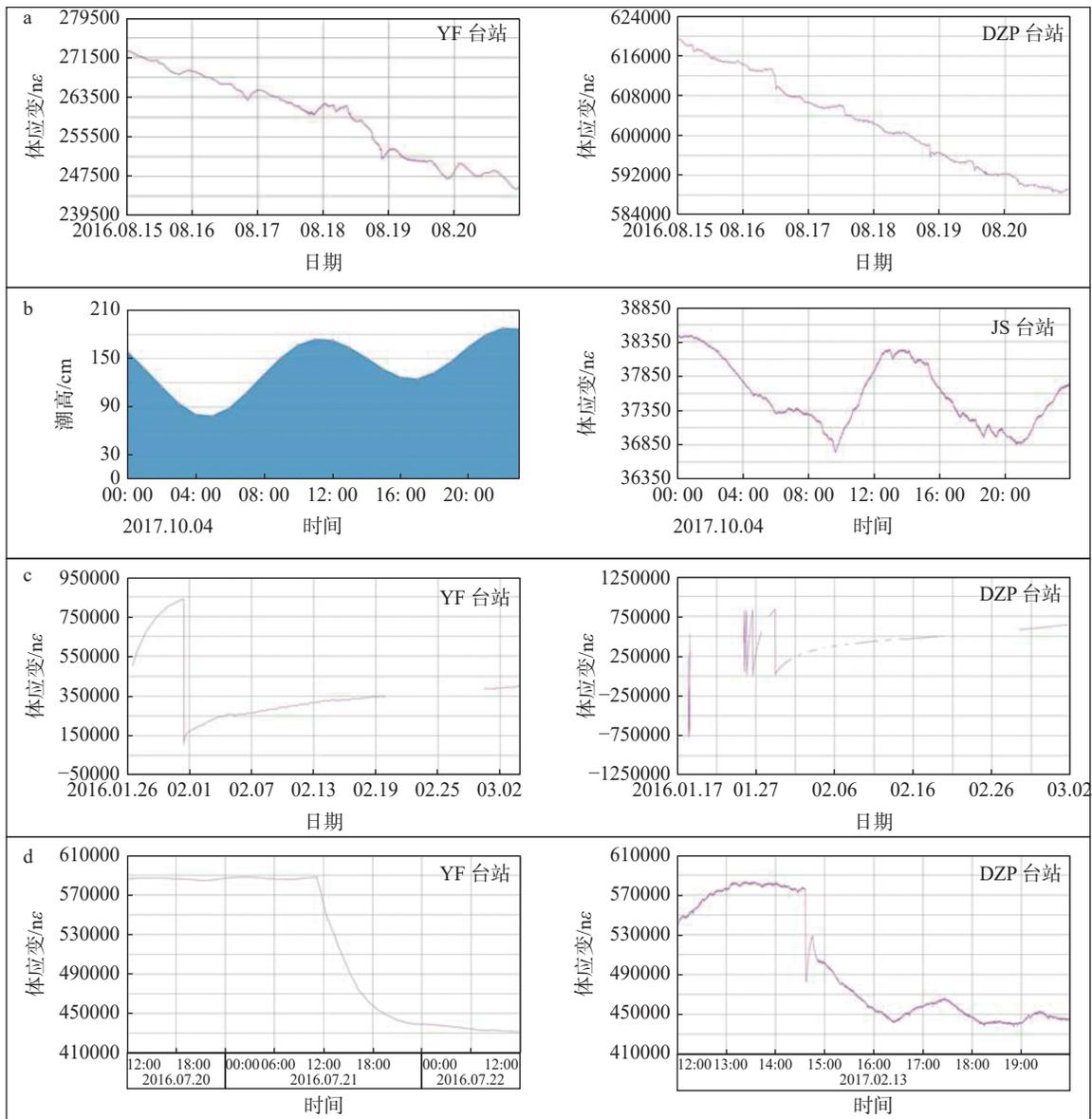


a—同震应变阶曲线特征; b—固体潮应变阶曲线特征

图 3 3 个台站体应变监测数据特征曲线  
Fig. 3 Characteristic curves of volume strain monitoring data from three stations  
(a) Coseismic step curves; (b) Earth tide step curves

表现在因能量增强或减弱引起波形连续缓慢的变化,并不能造成应变值大幅度的突变(应变降),例如,2016年8月15—20日应力曲线清晰显示了1608号台风“电母”通过琼州海峡区域时的应力变化特征(图4a),其特征显示为台风数天内应变值的逐渐持续下降,应变极差约30000 nε;而潮汐作用对应变值的影响主要表现在周期性的波动,与固体潮影响类似,也不能引起应变值突然大幅变化(图4b);通常人工干扰造成的应变突变的变化量较小,一般小于10000 nε,且在短时间内易恢复;此外,仪器自身

原因也可以导致应变变化,但大多能通过仪器维护时发现,例如2016年1月至2月底受耦合剂影响各台站监测数据均不稳定,出现短暂缺失,且均产生上升趋势(图4c),故不能参与数据分析。而构造、火山引起的应变变化,具有短时间内突然变化(图4d)和长时间内变化趋势趋于一致性的特征。因此,文章利用应变观测数据分析构造活动的主要依据为排除上述干扰后所保留的应变值突变与应变变化趋势情况。



a—台风应变曲线特征; b—潮汐应变曲线特征; c—仪器扰动应变曲线特征; d—构造活动应变曲线特征

图4 事件体应变特征曲线

Fig. 4 Volume strain characteristic curves of different events

(a) Strain curve characteristics of typhoon; (b) Strain curve characteristics of tidal; (c) Strain curve characteristics of instrumental disturbance; (d) Strain curve characteristics of tectonic activity

### 3 数据变化特征与构造活动分析

#### 3.1 钻孔应变监测数据变化特征

##### 3.1.1 JS 台站监测数据特征

位于马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂下盘的JS台站监测数据显示(表2),2016年应变值波动较大,1—2月应变数据出现间断,并且有短暂上升趋势,为仪器刚开始工作阶段耦合剂引起的应变异常导致不稳定所致。3—6月应变值在波动中持续下降,最高值为3月1日15:03的60127.2 nε,最低值为6月14日00:44的-5750.8 nε;其中监测到4月10日14:30(20103.3 nε)至4月11日22:23(6655.9 nε)期间发生快速应力降,应变极差达13468.5 nε,可能与阿富汗7.1级大地震诱发的断层同震活动有关;5月12日16:30至5月13日13:34左右发生第2次快速应力降,应变极差达19848 nε,与监测到的台湾宜兰海域两次5级以上地震诱发的断层同震活动有关;6月5日14:08至6月14日00:44发生第3次应力快速下降,应变极差值高达30463.3 nε,属局地应力变化。7—8月份应变总体呈增加趋势,但数据经历了4次“增长—降低”的波动,其中波动最大的是7月1日—8月14日的应变值由3064 nε快速增加至54119.1 nε,至8月20日11:20又突然下降至-3770.6 nε,应变极差高达57889.7 nε。另外,3次应变值逐渐增加的能量积累期分别为8月20日—9月20日(应变值增加24487.8 nε)、9月26日—10月18日(应变值增加24072.9 nε)、10月19日—11月22日(应变值增加24585.5 nε),而3次应变值快速降低分别发生在9月20日—26日(应变值下降21375.6 nε)、10月18日00:00—10月19日20:00(应变值下降25220.6 nε)和11月22日—11月28日(应变值下降20272.2 nε),反映了应力逐渐积累的特征,其中,10月18—19日的应力降可能为10月17日新不列颠M6.8级与青海玉树M6.2级地震远程效应诱发的断层活动有关(图5a、5b)。2017年1—12月体应变仪监测数据在波动中上升,4月11日11:35出现应变最高值88420.6 nε,10月19日5:47为最低值13060.4 nε,应变值相差75360.2 nε。其中,锦山地区经历了3个应力积累导致的应变值增加的周期,分别为:1月1日—4月11日(应变值增加63960.7 nε)、5月28日—6月19日(应变值增加30986.1 nε)、10月19日—12月30日(应变值增加41839 nε);2次应力释放导

致的应变值下降周期,分别为:4月11日—5月28日(应变值下降38206.1 nε)、6月19日—10月19日(应变值下降67804 nε),值得注意的是10月15—19日的应力降达38201.4 nε(图5c),经与中国地震台网地震数据对比,未发现近区域对应的大地震事件,仅有汤加群岛发生的1次6.3级地震,该应变降可能叠加了区域事件导致的地应力释放所致。2018年1—5月监测数据较为完整,应变值相对稳定,基本在动态调整中缓慢增加,期间经历了一次较大的调整:1月1日—4月5日应力积累导致的应变值增加,其极差值达25541.8 nε高峰,之后应变值稳中有降,至5月13日下降至最低值50692.7 nε,随后又持续呈波动性增长。

##### 3.1.2 YF 台站监测数据特征

YF台站位于近东西走向的马袅-铺前断裂上盘,地应力监测数据显示,2016年2月底仪器稳定接收数据之后,应变值主要经历了7月21日之前逐渐上升与7月21日之后逐渐下降两个阶段(表2)。第1阶段3月1日应变值由386584.5 nε至7月21日应变值达到全年最高值588246.9 nε,其中,3月23—25日、4月10日、5月27日3次快速的应力降应该都与大地震之后诱发的断层活动有关(图5d、图6)。第2阶段7月21日之后应变值持续下降,其中在7月21日与10月19日出现2次应变突变事件,应变极差值分别为154101 nε和90920 nε,与断层活动相关。2017年应变值表现为逐渐下降,其下降趋势可分为3个阶段。第1阶段1月1日—7月30日为持续下降阶段,6月30日—7月8日出现1次应力快速下降,应变极差值达18928 nε;之后进入8月—10月16日较为稳定的第2阶段,应变值基本维持在31905~40112 nε范围内,短时间内波动较小;10月17日00:00之后应变值突然下降,至17日8:00由之前的35847.5 nε下降至11213.8 nε,8小时内应变极差值达24713.9 nε,第3阶段自10月16日—12月31日监测到应变值较为稳定,但有缓慢上升的迹象。2018年有效监测数据持续至5月底,从监测数据曲线可以看出(图6),1月1日—4月14日,监测应变曲线呈短暂上升趋势,但上升值并不大,基本在25810~43936 nε之间,之后应变曲线又逐渐下降,至9月26日4—5时出现应力突变,1小时内降幅达19201.7 nε,但该段时间并未监测到地震事件,之后体应变监测曲线缓缓上升。

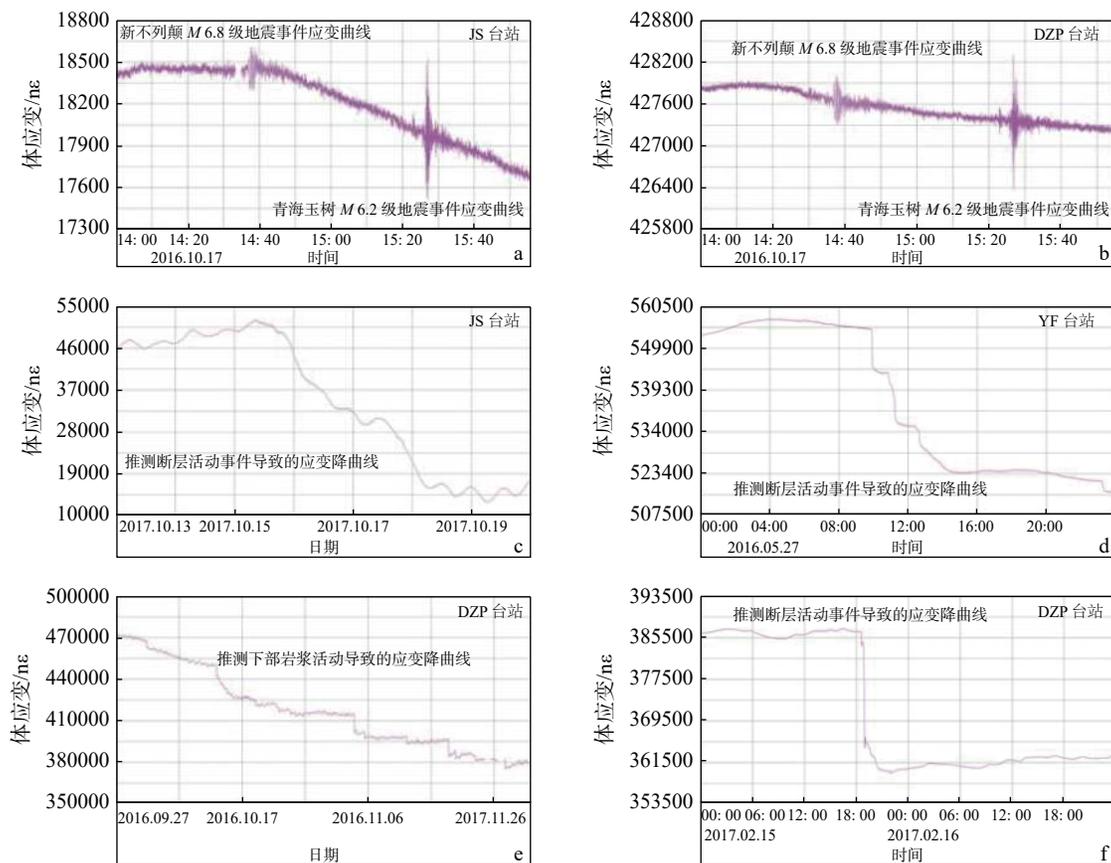
##### 3.1.3 DZP 台站监测数据特征

DZP台站位于研究区南部的铺前-清澜断裂上

表 2 地应力监测数据特征与构造事件提取一览表

Table 2 List of the features of in-situ stress monitoring data and extraction of tectonic events

台站	应变速率趋势特征		提取的主要应变速率数据特征		构造活动/事件分析	
	时间段	趋势特征	日期	应变突增量 (mc)	应变突降量 (mc)	
JS	2016.03—2016.06	波动中持续下降	2016.03.23—2016.03.25		17251.0	断层构造活动
	2016.07—2016.08	总体呈增加趋势; 经历4次波动; 增长阶段速度慢, 降低阶段速度快	2016.04.10—2016.04.11	/	13468.5	阿富汗7.1级大地震后能量释放/断层同震活动
			2016.05.12—2016.05.13	/	19848.0	台湾宜兰县海域两次5.8与6.2级大地震/断层同震活动
	2016.09—2016.12	相对稳定; 周期性波动	2016.08.14—2016.08.20	/	57889.7	断层活动
			2016.09.20—2016.09.26	/	21375.6	断层活动
			2016.10.18—2016.10.19	/	25220.6	地震远程效应/震后断层活动
			2016.11.22—2016.11.28	/	20272.2	远程地震震后断层活动
	2017.01—2017.12	波动中上升	2017.05.28—2017.06.19	30986.1	/	走滑断层蠕滑致能量积累
	2018.01—2018.05	相对稳定; 周期性波动	2017.10.15—2017.10.19	/	38201.4	断层活动
			/	/	/	/
YF	2016.03—2016.07	逐渐上升	2016.03.23—2016.03.25		9882.0	阿富汗7.1级大地震后能量释放/断层同震活动
	2016.07—2016.12	逐渐下降	2016.04.10	/	9467.0	台湾宜兰县海域两次5.8与6.2级远程大地震/震后断层活动
			2016.05.27	/	43727.7	斐济群岛6.2级同震断层活动
	2017.01—2017.07	持续下降	2016.07.21	/	154101.0	断层活动
			2016.10.19	/	90920.0	地震远程效应/震后断层活动
	2017.08—2017.12	先降后升	2017.06.30—2016.07.08	/	18928.0	断层蠕滑活动
	2018.01—2018.05	相对稳定	2017.10.17	/	24713.9	断层活动
			2018.04.14	/	10345.0	断层活动
	2018.09—2018.12	逐渐上升	2018.09.26	/	19201.7	断层活动
	DZP	2016.03—2016.07	缓慢下降	2016.03.16	/	/
2016.04.28				/	32278.0	断层活动
2016.08—2016.12		快速下降	2016.07.23	10367(下降后迅速上升)		断层活动
			2016.08.25	/	22583.0	断层活动
2017.01—2017.07		缓慢下降	2016.10.14	/	22294.0	地壳内部岩浆活动
			2016.11.18	/	12964.0	米林6.9级远程地震震后断层活动
2017.08—2017.12		相对稳定	2017.02.15	/	27182.0	地壳内部岩浆活动
			2017.07.30—2017.07.31	/	22453.0	断层活动
2018.01—2018.05		缓慢下降	2018.02.04	/	10777.0	局地构造活动(推测)
			2018.03—2018.05	缓慢上升—下降—较快速上升	/	11266.0



a—JS 台站监测到远程地震事件应变曲线; b—DZP 台站监测到远程地震事件应变曲线; c—JS 台站监测到的可能为断层活动事件应变曲线; d—YF 台站监测到的可能为断层活动事件应变曲线; e—DZP 台站监测到可能与岩浆活动事件相关的应变曲线; f—DZP 台站监测到的可能为断层活动事件应变曲线

图5 代表性构造事件应变曲线

Fig. 5 Strain curves of representative tectonic events

(a) Strain curves of representative remote seismic events detected by the JS station; (b) Strain curves of representative remote seismic events detected by the DZP station; (c) Strain curves may be related to fault activities detected by the JS station; (d) Strain curve may be related to fault activities detected by the YF station; (e) Strain curves may be related to magmatic events detected by the DZP station; (f) Strain curves may be related to fault activities detected by the DZP station

盘, 因 2016 年 1—2 月受仪器及耦合剂的影响数据不稳定。监测结果显示, 大致坡地区 3 月 1—27 日, 应变曲线整体上升, 中间经历了 3 月 15 日的 1 次弹性变化, 推测可能是由于仪器受耦合剂影响所致。3 月 27 日—7 月 31 日, 应变曲线整体缓慢下降, 应变下降值达 111863 nε, 其中 4 月 28 日有一次高达 32278 nε 的应力突降事件, 7 月 23 日应变曲线出现凹凸现象推测都与断层活动有关。8 月 1 日监测的应变值开始快速下降, 至 12 月 1 日应变值由 650415 nε 下降至 379278 nε, 极差值达 275761.4 nε; 其中 9—11 月份的应变曲线出现间歇性的持续下降(图 5e), 结合大致坡所处位置下部存在岩浆上涌活动的地球物理探测结果(胡久常等, 2007), 认为应变值的

持续下降可能与地壳内部岩浆活动导致的缓慢应力释放有关; 11 月 18 日的应变值突降应与米林 M 6.9 级远程地震导致的局地断层活动有关; 12 月 9 日之后, 应变数据又进入相对稳定期, 固体潮被压制较为明显。2017 年应变值整体呈逐步下降趋势, 其中, 1 月 1 日—7 月 31 日下降速度较快, 应变极差值达 73281.8 nε, 该段的事件涉及 2 月 15 日、7 月 31 日 2 次应力突变事件, 2 月 15 日 18:15 应变值由 383315.8 nε 骤降至 22:39 的 359512.8 nε(图 5f), 7 月 30 日 01:00 的应变值 344696 nε 突然下降至 7 月 31 日 16:40 的 322472.6 nε, 推测都与局地断层活动有关。8—12 月总体较稳定, 8 月 1 日—9 月 22 日应变曲线逐步上升, 之后又缓慢下降。2018 年 1—5 月,

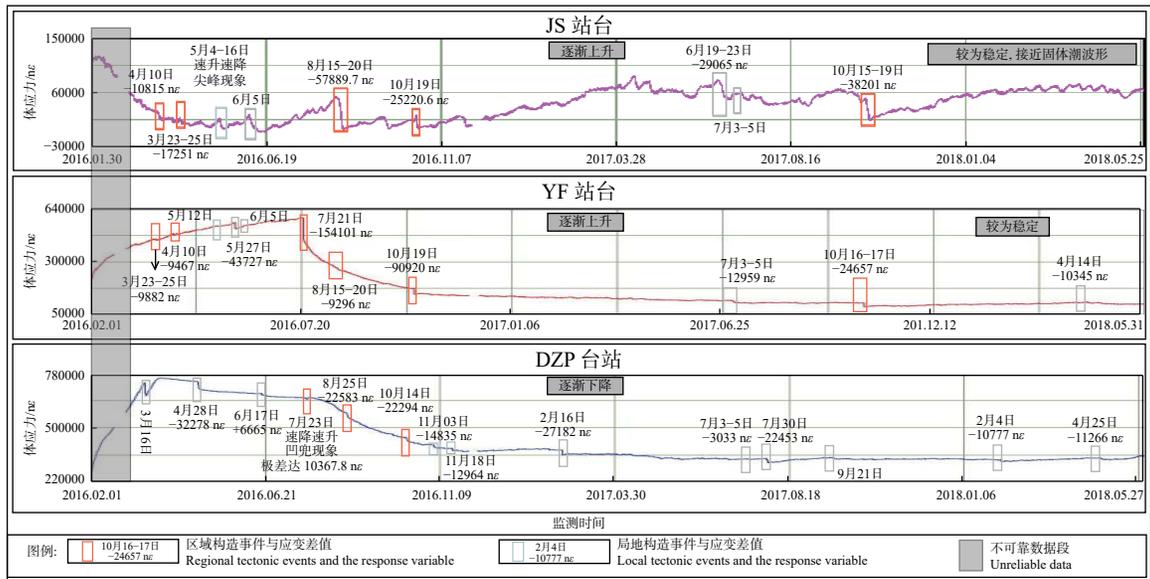


图6 体应变监测曲线对比图

Fig. 6 Comparison of volume strain monitoring curves in different stations

应变值曲线经历1月1日—2月12日缓慢下降阶段、2月12日—4月25日逐渐上升阶段、4月25—5月3日快速下降阶段和5月3日之后快速上升4个阶段。应变值的变化范围为328087~358411.4 ne, 总体变化不大。

### 3.2 应变突变事件对比分析

从图6中可以看出, 分别位于马泉—铺前断裂与铺前—清澜断裂上下盘的3个台站, 近3年来都在不断进行应力调整, 其应力调整的方式可能与大地震导致的应力释放、区域构造活动等有关, 而造成这些调整的既有区域性构造事件, 又有局地构造事件。区域构造事件会在多个台站有应变突变显示, 构造活动影响范围较大; 局地构造事件仅个别台站有应变值有响应, 影响范围很小。由监测数据分析总结得出, 发生6级以上大地震后2天内(甚至远至阿富汗地区), 台站监测到区域应力降事件概率较大, 这应该与该区域不稳定断层受到远程同震效应诱发发生滑动所致。例如2016年4月10日的应力突变事件在JS、YF台站都有显示, 应该是阿富汗7.1级地震后引起的远程区域性断层活动事件, 且应变差值接近, 大概为9467~17251 ne, 但JS较YF台站应变量大些, 说明诱发各断层活动量不一致; 2016年的10月17—21日之间, JS和YF台站均监测到较大的应变降, 这与10月17日新不列颠6.8级、10月17日玉树6.2级、10月19日印尼爪哇海6.5级、10月21日日本本州西部6.4级地震后远程效应导

致区内断层活动有关。显示区域构造事件的还有2016年7月21—23日YF台站和DZP台站的数据异常, 7月21日YF台站应变值出现骤降, 且幅度达154101 ne, 表明其释放的能量较3、4月份区域构造事件大15倍, 同时期的JS和YF台站也有监测到数据突变, 但幅值极差仅有6006 ne与10367 ne, 说明该构造事件主要发生在马泉—铺前断裂上盘某一部分(局部); 2016年8月14—20日JS台站监测到应变差为57889.7 ne, DZP台站在随后的8月25日监测到22583 ne的应变差, 可能与铺前—清澜断裂活动有关; 另外, 2017年10月15—19日, 在JS和YF台站也监测到应变差值高达24657~38201 ne的应变突降事件, 并且该事件在DZP台站的数据中没有明显显示, 说明构造事件主要发生在马泉—铺前断裂。局地构造事件在监测数据曲线中主要体现在单个台站有所显示, 例如2017年2月16日、7月30日、2018年2月4日的应力突降事件仅出现在DZP台站监测曲线中, 也说明这些构造事件不是区域性的, 仅存在于大致坡地下的某一部分(局部); 7月3—5日仅JS台站监测到应力突降事件, 说明构造活动可能是马泉—铺前断裂上盘的局地非震活动(如断层儒滑、岩浆上涌未引起地壳大规模变形等方式)。

### 3.3 应力变化趋势对比分析

在复杂应力作用下的钻孔岩体中, 应变与应力虽然不是简单的线性关系, 但是应变值作为与地应

力变化正相关的一个基础变量,仍然可以用于解释地壳运动过程中构造活动导致的应力大小及其趋势变化,并已得到广泛认可(邱泽华等,2020)。

体应变监测数据显示,JS、YF和DZP台站监测到的地应变变化量分别为-2418~85734 nε、12585~585161 nε和322780~757450 nε,应变极差值分别为88152 nε、572576 nε和434670 nε,说明3个应变监测部位调整变化量为:YF>DZP>JS。

从图6中可以清晰的看出,3个台站体应变监测数据曲线的趋势情况,其中JS台站2016—2018年应变值整体呈逐渐增加趋势,体应变曲线表现为“上升—下降”几十个周期,代表地应力在增加过程

中不断的“积累—释放—积累—释放”中进行,推测该站所在区域整体处于一个挤压状态,并且在受挤压的过程中通过构造活动不断的调整应力状态;YF台站2016—2018年体应变监测数据曲线整体以下降趋势为主,2016年3—7月有短暂的上升特征,2016年7月21日之后开始快速下降,2017年之后下降速度趋缓,代表位于马袅—铺前断裂上盘地区近3年来整体处于地应力松弛状态,并且在应力松弛过程中受区域构造活动影响;DZP台站钻孔体应变监测值近3年来也整体呈下降趋势,说明该站所在区域整体亦处于应力释放期。

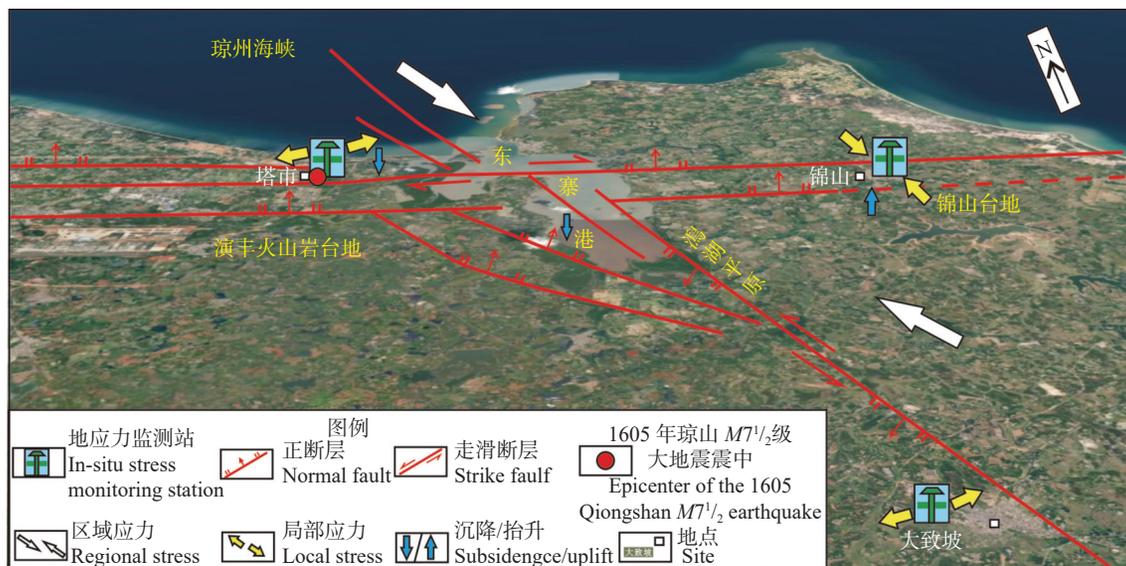


图7 1605年琼山M7½级地震区地应力状态与东寨港沉降趋势示意图

Fig. 7 In-situ stress state in the 1605 Qiongzhan M7½ earthquake area and subsidence trend of Dongzhaigang

对比3个台站的地应力变化阶段可知,2016年:3—6月,JS台站和DZP台站均呈地应力下降阶段,而同期的YF台站却处于上升阶段;6—7月下旬,JS和YF台站应变值呈上升趋势,而DZP台站应变值趋势为下降;8—12月3个台站地应力变化趋势均为下降,并且YF台站下降值最大。2017年:1—7月,JS台站应变值趋势为上升,但依然在“上升—下降—上升—下降”的地应力调整中整体上升,同期YF台站与DZP台站应变值趋势均为逐渐下降,且在下降过程中有应力突降事件发生,尤其是DZP台站在2月16日、7月30日分别有22453 nε和27182 nε的降幅;8—12月JS台站前期受应力挤压作用应变曲线为“上升—下降—上升”的凹形表现,YF台站监测曲线较为平直稳定,但在10月15—19日,上述两个台站均受到区域构造活动影响出现应力突

降,降幅较为接近,分别为38201 nε和24657 nε,而同期的DZP台站监测数据曲线在经历了7月30日应力突降后进行了应力调整,在9月21日前有缓慢上升,之后又趋于下降,对于10月15—19日应力突变事件没有同步反映,说明该次构造活动仅发生在北部。2018年:1—5月JS台站应变监测数据仍然是在波动中上升,反映了其处于挤压应力状态,而YF和DZP台站则仍然以下降趋势为主,其过程经历了多期局地应力突降事件(图6)。

## 4 讨论

构造地貌演化过程会引起相应的地壳应力应变响应。东西向马袅—铺前断裂与北西向铺前—清澜断裂围陷的东寨港地堑形成演化过程也是两组

断裂与下部岩浆不断活动的过程,上述地应力监测数据及变化趋势对分析断层活动趋势、东寨港现今的沉降过程及其发展趋势、研究东寨港沉降机理等具有重要指示作用。

#### 4.1 主要控貌断层动态活动过程

已有应变场数值计算研究认为,走滑型断层在地表最大剪应变出现在上盘一侧,正倾滑断层倾角越大最大剪应变和正应变越靠近下盘(邱虎,2004)。控制东寨港形成的东岸铺前-清澜断裂分支断裂( $F_{13.1}$ )为北西走向,正断兼左旋走滑性质,倾角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ;北部近东西走向的马袅-铺前断裂( $F_{2.2}$ )为正断层,局部兼走滑,倾角 $80^{\circ}$ 左右,靠近地表倾角逐渐增大(Wang et al., 2023)。而DZP台站位于铺前-清澜断裂上盘和倾角近直立的马袅-铺前断裂下盘,体应变值在3个台站中最大,达 $322780\sim 757450\text{ n}\epsilon$ ,说明其应变值变化主要是受两组断裂活动所致。同理YF台站的应变值高达 $12585\sim 585161\text{ n}\epsilon$ ,也主要是由于其所处于马袅-铺前断裂下盘所致。应变值范围在 $-2418\sim 85734\text{ n}\epsilon$ 的JS台站地应力变化量最小,也是与其位于马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂的下盘有关。应变场数值模拟计算与实际监测结果规律一致,说明监测结果用于分析断层活动比较可靠。

从3个台站的应变监测数据趋势与应力突变事件来看,2016年3—5月地应力监测数据值,JS台站和DZP台站为下降趋势,YF台站为上升趋势,该段时间北西方向区域主压应力(胡道功等,2019)的加持导致YF台站应力不断积累,而JS、YF台站3月23—25日、4月10日、5月4—16日的应力突变事件,可能指示马袅-铺前断裂的不断活动调整局部应力场,从而使下盘的JS台站和DZP台站应力逐渐释放。6月1日开始区域应力场可能作用于铺前-清澜断裂东支,使得右旋走滑力量累积导致JS台站应变值开始上升,7月21日,YF台站应变数据降幅达 $154101\text{ n}\epsilon$ ,可能也与应力积累到一定程度导致马袅-铺前断裂再次活动从而使其应变值突降调整有关。8—12月JS台站应变值在波动调整中上升,而YF与DZP台站则以下降为主,推测该段时间铺前-清澜断裂应以右旋挤压应力为主;10月14—21日3个台站应力均有突降,YF台站数据降幅较JS和DZP数据小,应该是受新不列颠群岛 $M 6.8$ 级、日本本州 $M 6.4$ 级(图5a)、印尼爪哇海 $M 6.5$ 级等几个大地震的同震效应(台站接收到应变波)的诱发,马袅-

铺前断裂和铺前-清澜断裂均有活动,但YF台站因地表的软土吸收应力变化量最小。2017年1—12月,马袅-铺前断裂右旋与铺前-清澜断裂左旋挤压应力的积累导致JS台站应变值一直在波动中略有抬升,而YF台站和DZP台站所处位置的应变一直是下降趋势,可以推测马袅-铺前断裂与铺前-清澜断裂在活动过程中使得下盘的地块应力不断得到释放,其中10月15—19日的应力突变事件主要在JS和YF台站有显示,说明此次构造活动可能与马袅-铺前断裂活动有关。由于DZP台站位于海南岛东部的南北地震带上,已有地球物理探测研究认为下部有岩浆上涌(胡久常等,2007),而具有正断兼走滑的铺前-清澜断裂(胡道功等,2022)以拉伸的剪切应力为主,数值模拟显示,拉伸剪切应力的持续作用下会引起下部岩浆囊压力逐渐减小(陈会仙等,2009),可能传递到上地壳的应力也会逐渐减小。因此,DZP台站的应力持续降低趋势,有可能与其下部的岩浆活动有关。2018年1—5月JS台站应力继续波动略有上升,而YF和DZP台站以下降趋势为主,推测受区域挤压应力影响,导致马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂的右旋走滑应力积累为主。

总之,2016年3月—2018年5月,YF台站和DZP台站以地应力逐渐降低为主,反映出其处于拉张应力环境,JS台站地应力逐渐增高指示了其处于挤压应力环境,说明研究区总体上受北西挤压应力场为主(图6,图7),这也与前期铺前地应力测量孔得出的 $330^{\circ}$ (胡道功等,2019)应力方向相一致。3个台站应变观测数据的趋势及应力突变情况可以推出马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂在区域构造应力场作用下,在不断进行非震活动来调整局部应力场,其中,马袅-铺前断裂在2016年3—7月、2017年10月和2018年4月有过多次活动;铺前-清澜断裂在2017年10月和2018年4月有过2次活动,根据断层活动次数与应变值变化量来看,马袅-铺前断裂应该较铺前-清澜断裂活动能量强,此外,体应变监测数据也可能指示了位于南北地震带下部的岩浆活动痕迹。

#### 4.2 东寨港沉降趋势与机理分析

##### 4.2.1 东寨港沉降趋势

地貌演化过程的内、外动力作用过程也会引起地应力的局部变化。从1605年琼山 $M 7\frac{1}{2}$ 级地震区的3个钻孔应变监测台站2016年3月—2018年5月

的数据曲线趋势可以分析出东寨港沉降趋势: ①YF台站和DZP台站的地应力逐渐降低特征反映了两台站处于拉张应力环境, JS台站地应力逐渐增高指示其以挤压应力环境为主, 可以推测以铺前-清澜断裂( $F_{13-1}$ )为界, 东部有逐步抬升趋势, 西部的东寨港可能还会持续沉降; ②台站应变观测数据的趋势及应力突变情况显示的东西走向的马袅-铺前断裂现今活动能量和次数远大于铺前-清澜断裂, 在一定程度上指示了以马袅-铺前断裂( $F_{2-2}$ )为界, 东寨港的沉降量北部大于南部, 并且今后一段时间内北部演丰地区沉降幅度仍会大于南部地区。

#### 4.2.2 东寨港沉降机理

1605年东寨港地区发生的M7½级地震, 是中国迄今唯一有历史地震记载的曾导致大面积陆陷成海的大地震事件, 陆陷成海的总面积超过100 km<sup>2</sup>, 沉陷最深超过10 m, 光纤位移监测结果显示, 东寨港地区至今仍在沉降(胡道功等, 2022); 据此, 通过地应力监测数据分析, 综合认为东寨港沉降主要受以下因素的控制和影响。

##### (1) 内动力岩浆上涌与断裂活动

东寨港位于雷琼裂谷地块内部, 新生代以来火山作用频繁, 存在广泛的幔源基性岩浆活动(黄镇国等, 1993)。大地电磁探测结果显示, 位于琼山地震区深部约15 km以下存在一直通上地幔的深部低阻体, 并推测为一个正在上升状态的岩浆囊(胡久常等, 2007); 刘营等(Liu et al., 2021)亦通过大地电磁探测法发现琼北东寨港地区中上地壳存在低阻体, 推测可能是岩浆运输的导管系统或岩浆上升通道。

展布于东寨港两岸的铺前-清澜断裂东西2支倾向相反的正断层, 被认为是控制东寨港陆陷成海的主要断裂(陈恩民和黄咏茵, 1979, 1989; 徐起浩, 1986a, 1986b, 1986c, 2006)。铺前-清澜断裂中新世以来一直在持续活动(丁莹莹等, 2018; 贾丽云等, 2021), 东寨港东岸断裂中新世以来累计垂直位移高达179 m。断层在黏滑变形作用下, 断层面上会发育“镜面构造”, 碎裂岩芯常发育断层泥(辛鹏等, 2023), 但该区实际钻孔岩芯地层仅在断层带岩芯中发现含贝壳的粗屑砂层(王超群等, 2022), 未发现明显全新世断层泥等活动痕迹,(胡道功等, 2019; 2022), 因此, 推测其全新世以来活动可能具有蠕滑特征。近东西向的马袅-铺前断裂至少自上新世以来就发生正断活动(李薇等, 2019), 并且发生1605年琼山M7½级大地震(王超群等, 2021; 2022;

Wang et al., 2021)直接导致海水倒灌成海。现今的钻孔地应力监测结果也显示马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂在区域构造应力场作用下, 在不断进行非震活动, 因此, 东寨港下部幔源岩浆的上升导致岩石圈伸展及区域断裂的正断活动可能为东寨港沉降的内动力控制因素。

##### (2) 外动力软土流滑与海水侵蚀

已有研究表明地震前东寨港海岸已发生缓慢下沉(徐起浩, 1986a), 除了地震同震位移导致的东寨港北部快速沉降以外, 外动力因素也加速了地震后长期缓慢的非震沉降。

砂土液化和软土沉降是引起地面沉降的常见原因, 也是东寨港晚期沉降的外动力因素。全新世早中期的软土沉积覆盖了整个东寨港地区, 并向东扩展到罗豆农场及珠溪河一带, 向西经桂林洋直达海口地区(图1)。琼山大地震时建立在软土层上的村庄在遭遇地震时极易造成建筑物失稳而下沉, 后期调查发现的现今民房及围墙开裂等也与该区软土沉降有关。同时, 软土也容易受到水流的侵蚀, 东寨河现今已沉没在东寨港海底, 但退潮时依稀可以看到深切的古河道, 这种高低不平的海底地貌容易引起海水水流动能加剧, 导致对港湾的进一步侵蚀, 从而在一定程度上加速东寨港的沉降。

以钻孔应变观测结果为基础, 结合前期对区域内深部岩浆探测(胡久常等, 2007; Liu et al., 2021; Wang et al., 2021)、活动断层(王超群等, 2021; 2022)、第四纪沉积地层(梁定勇等, 2021)、海平面变化以及岩土体(胡道功等, 2019; 2022)等研究成果综合分析认为, 东寨港沉降主要受深部岩浆上涌导致上地壳的马袅-铺前断裂与铺前-清澜断裂活动控制, 并受到全新世海平面变化与软土沉积地层性质导致软土流滑、砂土液化以及海水侵蚀等方面的影响。

#### 4.3 存在不足与展望

钻孔应变观测是一项需要长期坚持的工作, 主要应用在地震地质、工程地质、地质灾害等研究或工程领域。因钻孔应变观测仪不仅对地应力变化具有高灵敏度的特性, 还可以记录构造地貌演化过程中的沉降、剥蚀、滑塌以及控貌断层的活动信息, 对于探索构造地貌演化规律或演化趋势具有重要的学术价值与应用价值。文中仅用了不到3年的应变观测数据来分析东寨港沉降趋势与机理, 难免会有不足, 相信随着后期观测数据的增加和更多有规律的应变记录出现, 1605年琼山M7½级地震区

东寨港地貌演化规律和发展趋势会更加明晰。同时,应变数据分析与地质事件的提取需要复杂、多学科的知识贮备,文中对事件的提取也可能存在诸多不足,需要更多相关专业背景的学者指正补充。

## 5 结论

(1) 1605年琼山 $M7\frac{1}{2}$ 级大地震区的3个钻孔应变监测台站2016年3月至2018年5月应变数据显示, YF台站和DZP台站以地应力逐渐降低反映的拉张应力环境为主, JS台站地应力逐渐增高指示以挤压应力环境为主, 指示东寨港地区总体上处于北西向挤压应力环境。3个台站应变观测曲线的趋势及应力突变特征说明马袅-铺前断裂和铺前-清澜断裂在区域应力场作用下, 通过不断发生非震活动来调整局部应力场, 其中, 马袅-铺前断裂在2016年3—7月、2017年10月和2018年4月有过多次活动; 铺前-清澜断裂在2017年10月和2018年4月有过2次活动, 根据断层活动次数与应变值变化量来看, 马袅-铺前断裂应该较铺前-清澜断裂活动能量强。

(2) 2016年3月—2018年5月钻孔应变监测曲线分析东寨港沉降趋势: 以铺前-清澜断裂( $F_{13-1}$ )为界, 东部有逐步抬升趋势, 西部的东寨港可能还会持续沉降; 台站应变观测曲线及应力突变情况显示的东西走向马袅-铺前断裂现今活动能量和次数远大于铺前-清澜断裂, 以马袅-铺前断裂( $F_{2-2}$ )为界, 东寨港的北部演丰地区沉降速率大于南部三江地区, 今后一段时间内北部的沉降幅度仍会大于南部。

(3) 钻孔应变观测成果与深部岩浆探测、活动断层、第四纪沉积地层、海平面变化以及岩土体研究成果综合分析认为, 东寨港沉降主要受深部岩浆上涌、上地壳的马袅-铺前断裂与铺前-清澜断裂联合控制, 同时还受到全新世海平面变化与软土沉积地层性质导致软土流滑、砂土液化以及海水侵蚀等多方面影响。

**致谢:** 中国地质科学院地质力学研究所的彭华研究员、孙尧博士等同事在监测站建设与数据采集处理方面给予了很大帮助和指导; 三位审稿专家以及编辑老师等对文章提出了宝贵建议和意见, 在此一并表示感谢。

## References

CHEN E M, HUANG Y Y, 1979. Preliminary Discussion on the 1605 Qiong-

zhou earthquake and its Seismogenic Structure. [J]. Seismology and Geology, 04: 37-44.

CHEN E M, HUANG Y Y, 1989. Earthquake damage characteristics and three-dimensional photoelastic experiments of the 1605 Qiongzhou earthquake in Hainan Island[J]. Journal of Earthquake Engineering(2): 65-72. (in Chinese with English abstract)

CHEN H X, HONG H J, LIU H, 2009. Volcano-tectonic interaction and the relation with the state of volcanic activity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(5): 1263-1269. (in Chinese with English abstract)

DING Y Y, ZHAO X T, HU D G, et al., 2018. Late Cenozoic Fault activity in northeastern Hainan Island and its controlling effect on tectonic subsidence in Dongzhai port[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(2): 155-166. (in Chinese with English abstract)

HU D G, MA X M, JIA L Y, et al., 2019. Report on investigation of active faults in Pan-Pearl River Delta region and evaluation of demineralization and crustal stability[R]. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese)

HU D G, HAN J E, ZHANG L, et al., 2022. Report on investigation and evaluation results of active faults and crustal stability in Hainan Island and offshore areas[R]. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese)

HU J C, BAI D H, WANG W H, et al., 2007. Magnetotelluric surveying and electrical structure of the deep underground part in Leiqiong volcanic area[J]. South China Journal of Seismology, 27(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

HUANG Z G, CAI F X, HAN Z Y, et al., 1993. Leiqiong Quaternary volcano[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)

JIA L Y, HU D G, ZHANG L, et al., 2021-12-17. The past and present lives of Hainan Dongzhai port[N]. China Mining News. (in Chinese)

JIANG J X, YIN G H, XU F Z, 2003. Relative stress field change of Ku'erle region before 8.1 earthquake in western Kunlun Pass[J]. Earthquake, 23(3): 89-96. (in Chinese with English abstract)

LI P, YANG M, LIU X, et al., 1988. Analysis of active fault in the northern Qiongzhou( A. ). Ding Yuanzhang. Collection of Earthquake Studies in Northern Hainan Island. Beijing: Seismological Press, 41~52 (in Chinese).

LI F Q, 1985. In-situ stress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 4(1): 95-111.

LI W, JIA L Y, HU D G, et al., 2019. Late Pleistocene tectonic history of the western segment of Maniao-Puqian fault: evidence from the Laocheng section, northern Hainan Island[J]. Geoscience, 33(5): 970-978. (in Chinese with English abstract)

LIANG D Y, XU G Q, XIAO Y, et al, 2021. Neogene-Quaternary stratigraphic standard and combined zoning of Haikou Jiangdong New District[J]. Science Technology and Engineering, 21(26): 11052-11063. (in Chinese with English abstract)

LIU H G, WU X J, LI F, et al., 2018. Active characteristics of the middle segment of Maniao-Puqian fault in the Holocene[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 13(3): 588-599. (in Chinese with English abstract)

LIU Y, DU J S, HU Z W, et al., 2021. Crustal magma plumbing system beneath the Quaternary volcanic area (northern Hainan Island, China) re-

- vealed by magnetotelluric data[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 419: 107362.
- MENG Q, GAO K, CHEN Q, et al., 2021. Seismogenic, coseismic and post-seismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: numerical simulation analysis[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(4): 614-627. (in Chinese with English abstract)
- PENG C G, 1983. Cause of the Land Subsidence Associated With the Historical Qiong Zhou Earth Quake (13 July 1605)[J]. *Seismology and Geology*, 5(3): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2008. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress monitoring station[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 97-108. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2011. In-situ stress measurement by differential strain analysis method in WFSD-1[J]. *Journal of Geomechanics*, 17(3): 249-261. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, LI Z. et al. 2019. Report on Geostress Observation and Crustal Stability Evaluation in Bohai Strait, Taiwan Strait, Qiongzhou Strait and Other Sea Areas (Open Edition)[R]. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, WU Z H, MA X M, 2006. Unmanned in-situ stress monitoring stations along the Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Geomechanics*, 12(1): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, CHEN Q C, MENG W, et al., 2018. Evaluating measured in-situ stress state changes associated with earthquakes and its implications: a case study in the Longmenshan fault zone[J]. *Journal of Geomechanics*, 24(3): 309-320. (in Chinese with English abstract)
- QIU H, 2004. Research of distribution feature of strain field and evolution of surface rupture caused by earthquake fault[D]. Tianjin: Tianjin University. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, XIE F R, SU K Z, et al, 2004. New era of borehole strain observation[J]. *Recent Developments in World Seismology*(1): 7-14. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, KAN B X, TANG L, et al., 2006. Inversion of coseismic stress-triggered fault slips using borehole strain meter observations[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(6): 596-602. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, 2010. A review of component borehole observation of stress-strain in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30(5): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, TANG L, GUO Y P, et al., 2020. Observing tectonic strain rates using four-gauge-borehole-strainmeters (FGBS)[J]. *Progress in Geophysics*, 35(5): 1688-1701. (in Chinese with English abstract)
- TAN C X, ZHANG P, LU S L, et al., 2019. Significance and role of in-situ crustal stress measuring and real-time monitoring in earthquake prediction research[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 866-876. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Q, JIA L Y, HU D G, et al., 2021. Activity of eastern part of the Maniao-Puqian fault in northern Hainan Island and its evaluation of crustal stability[J]. *Geology in China*, 48(2): 618-631. (in Chinese with English abstract)
- WANG C Q, JIA L Y, HU D G, et al., 2021. Seismogenic structure of the 1605 Qiongzhou M1/2 earthquake and its Holocene activity history in northern Hainan Island, China: evidence from cross-section drilling and shallow seismic profile[J/OL]. *Journal of Earth Sciences*: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.P.20211126.1558.004.html>.
- WANG C Q, JIA L Y, HU D G, et al., 2022. Quaternary activity characteristics of the Maniao-Puqian fault in the Jiangdong New District of Haikou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(2): 403-417. (in Chinese with English abstract)
- WANG L M, CHEN C, LIU J P, et al., 2023. On comprehensive application of seismic reflection and MASW method for investigation of urban subsurface active faults and underneath structures: a case study in Haikou City of Hainan Province, China[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 212: 104982.
- WEST M, SÁNCHEZ J J, MCNUTT S R, 2005. Periodically triggered seismicity at Mount Wrangell, Alaska, after the Sumatra earthquake[J]. *Science*, 308(5725): 1144-1146.
- WU G H, 2008. Physical geography[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- XU Q H, 1985. Discussion on subsidence mechanism of Qiongzhou earthquake[J]. *South China Journal of Seismology*, 5(4): 30-37. (in Chinese)
- XU Q H, 1986a. Recent sinking in the Dongzhai Harbour area, northern Qiongzhou[J]. *Marine Sciences*, 10(1): 24-28. (in Chinese with English abstract)
- XU Q H, 1986b. Understanding of seismic geology in Leiqiong Sag[J]. *South China Journal of Seismology*, 6(1): 83-93. (in Chinese)
- XU Q H, 1986c. Formation and migration of Dongzhai port in the Northern Hainan Island and the major Qiongzhou earthquake of 1605[J]. *Seismology and Geology*, 8(3): 92-96. (in Chinese with English abstract)
- XU Q H, 1988. New genesis of Dongzhai Harbor in Hainan Island[J]. *Earth*(4): 10-11. (in Chinese)
- XU Q H, 1990. Subsidence caused by the Qiongzhou large earthquake in 1605 and the formation and vicissitude of Dongzhaigang Bay on Hainan Island[J]. *Earthquake Research in China*, 4(1): 71-82.
- XU Q H, 2006. The Coseismic Coast Fast Sinkage and the Following Possible Tsunami Caused by the 1605Qiongzhou Strong Earthquake and the Evidence[J]. *South China Journal of Seismology*, 1: 17-27. (in Chinese with English abstract)
- XU S C, GAO X K, LI H Y, 1982. Large-scale subsidence may be the evidence of phase transition in the source area: preliminary study on the genesis of the Qiongzhou earthquake[J]. *South China Journal of Seismology*, 2(1): 3-7. (in Chinese)
- XIN P, WANG T, LIU J., et al., 2023. The geological structure and sliding model of slope in the triggering area of Yigong landslide in Tibet[J]. *Journal of Geomechanics*, 29(3): 1012-1023. (in Chinese with English abstract)
- YAN Y D, CHEN E M, HUANG Y Y, 1988. Three-dimensional Photoelastic simulating experiments to tectonic stress field of great Qiongzhou earthquake Of 1605 in Hainan, China[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 10(2): 63-70. (in Chinese with English abstract)
- YANG J C, LI Y L, 2005. Principles of geomorphology[M]. Beijing: Peking University Press. (in Chinese)
- ZHU H, 2008. Using borehole strain data to forecast the Yanjin M5.1 earth-

quake, Yunnan Province, on 22 July 2006[J]. Earthquake Research in Sichuan(1): 4-8. (in Chinese with English abstract)

### 附中文参考文献

- 陈恩民, 黄咏茵, 1979. 1605年海南岛琼州大地震及其发震构造的初步探讨[J]. 地震地质, 4: 37-44.
- 陈恩民, 黄咏茵, 1989. 1605年海南岛琼州大地震的震害特征和发震构造研究[J]. 地震学报, 11(3): 319-331.
- 陈会仙, 洪汉净, 刘辉, 2009. 岩浆活动与构造应力的相互作用及其与火山活动状态的关系[J]. 地球物理学报, 52(5): 1263-1269.
- 丁莹莹, 赵希涛, 胡道功, 等, 2018. 琼东北晚新生代断裂活动及其对东寨港沉降的控制作用[J]. 地球学报, 39(2): 155-166.
- 胡道功, 马秀敏, 贾丽云, 等, 2019. 泛珠三角地区活动断裂调查与去与地壳稳定性评价成果报告[R]. 中国地质科学院地质力学研究所.
- 胡道功, 韩建恩, 张磊, 等, 2022. 海南岛及近海活动断裂与地壳稳定性调查评价成果报告[R]. 中国地质科学院地质力学研究所.
- 胡久常, 白登海, 王薇华, 等, 2007. 雷琼火山区地下深部大地电磁探测与电性结构分析[J]. 华南地震, 27(1): 1-7.
- 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 等, 1993. 雷琼第四纪火山[M]. 北京: 科学出版社.
- 贾丽云, 胡道功, 张磊, 等, 2021-12-17. 海南岛东寨港的前世今生[N]. 第A3版, 地质调查, 中国矿业报.
- 蒋靖祥, 尹光华, 许凤柱, 2003. 昆仑山口西8.1级地震前库勒测区相对应力场变化[J]. 地震, 23(3): 89-96.
- 李方全, 1985. 地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 4(1): 95-111.
- 李珏, 杨美娥, 刘行松, 等, 1988. 琼北地区活动性断裂的研究[A]. 丁原章主编. 海南岛北部地震研究文集. 北京: 地震出版社, 41-52.
- 李薇, 贾丽云, 胡道功, 等, 2019. 琼北老城剖面记录的马袅-铺前断裂西段晚更新世活动历史[J]. 现代地质, 33(5): 970-978.
- 梁定勇, 许国强, 肖瑶, 等, 2021. 海口江东新区新近纪-第四纪标准地层与组合分区[J]. 科学技术与工程, 21(26): 11052-11063.
- 刘华国, 吴小江, 李峰, 等, 2018. 马袅-铺前断裂中段全新世活动特征研究[J]. 震灾防御技术, 13(3): 588-599.
- 孟秋, 高宽, 陈启志, 等, 2021. 2008年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟[J]. 地质力学学报, 27(4): 614-627.
- 彭华, 吴珍汉, 马秀敏, 2006. 青藏铁路无人值守地应力综合监测站[J]. 地质力学学报, 12(1): 96-104.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2008. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应[J]. 地质力学学报, 14(2): 97-108.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2011. 差应变法地应力测量: 以汶川地震断裂带科学钻探WFSD-1钻孔为例[J]. 地质力学学报, 17(3): 249-261.
- 彭华, 马秀敏, 李振, 等, 2019. 渤海海峡、台湾海峡、琼州海峡等海域地应力观测与地壳稳定性评价成果报告(公开版)[R]. 中国地质科学院地质力学研究所.
- 秦向辉, 陈群策, 孟文, 等, 2018. 大地震前后实测地应力状态变化及其意义: 以龙门山断裂带为例[J]. 地质力学学报, 24(3): 309-320.
- 邱虎, 2004. 地震断层错动产生的应变场特征的研究及地表破裂的评价[D]. 天津: 天津大学.
- 邱泽华, 谢富仁, 苏恺之, 等, 2004. 发展钻孔应变观测的战略构想[J]. 国际地震动态(1): 7-14.
- 邱泽华, 阚宝祥, 唐磊, 等, 2006. 用钻孔应变资料反演同震应力触发断层活动[J]. 地震学报, 28(6): 596-602.
- 邱泽华, 2010. 中国分量钻孔地应力-应变观测发展重要事件回顾[J]. 大地测量与地球动力学, 30(5): 42-47.
- 邱泽华, 唐磊, 郭燕平, 等, 2020. 用四分量钻孔应变仪观测构造应变速率[J]. 地球物理学进展, 35(5): 1688-1701.
- 谭成轩, 张鹏, 路士龙, 等, 2019. 原位地应力测量与实时监测在地震预报研究中的作用和意义[J]. 地质力学学报, 25(5): 866-876.
- 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等, 2021. 海南岛北部马袅-铺前断裂东段活动性与地壳稳定性评价[J]. 中国地质, 48(2): 618-631.
- 王超群, 贾丽云, 胡道功, 等, 2022. 海口市江东新区马袅-铺前断裂第四纪活动特征[J]. 地质学报, 96(2): 403-417.
- 伍光和, 2008. 自然地理学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社.
- 徐起浩, 1985. 琼山地震沉降机理讨论[J]. 华南地震, 5(4): 30-37.
- 徐起浩, 1986a. 琼北东寨港地区的近期下沉[J]. 海洋科学, 10(1): 24-28.
- 徐起浩, 1986b. 对雷琼凹陷地震地质的认识[J]. 华南地震, 6(1): 83-93.
- 徐起浩, 1986c. 海南岛北部东寨港的形成、变迁与1605年琼州大地震[J]. 地震地质, 8(3): 92-96.
- 徐起浩, 1988. 海南岛东寨港成因新说[J]. 地球, (4): 10-11.
- 徐起浩, 2006. 1605年琼山强地震导致的同震海岸快速下沉、可能紧随的海啸及其证据[J]. 华南地震, 1: 17-27.
- 许寿椿, 高喜奎, 李海玉, 1982. 大面积沉陷可能是震源区相变的证据: 琼州大震成因初探[J]. 华南地震, 2(1): 1-5.
- 辛鹏, 王涛, 刘甲美, 等, 2023. 西藏易贡滑坡源区坡体赋存的地质结构及其滑动模式[J]. 地质力学学报, 29(3): 1012-1023.
- 颜玉定, 陈恩民, 黄咏茵, 1988. 1605年琼州大地震构造应力场的三维光弹实验[J]. 西北地震学报, 10(2): 63-70.
- 杨景春, 李有利, 2005. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社.
- 朱航, 2008. 使用钻孔应变测值预测2006年7月22日云南盐津5.1级地震[J]. 四川地震, (1): 4-8.
- 彭承光, 1983. 1605年7月13日琼州历史地震陆沉原因[J]. 地震地质, 5(3): 9-15.

### 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

