引文格式:唐磊,邱泽华,李玉江,等.四分量钻孔应变观测近地表应力应变状态的判定与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(1):63-73.DOI:10.13203/j.whugis20220397

Citation:TANG Lei,QIU Zehua,LI Yujiang,et al.Determination and Analysis of Near-Surface Stress-Strain State of 4-Component Borehole Strainmeter[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(1):63-73.DOI:10.13203/j.whugis20220397

四分量钻孔应变观测近地表应力应变状态的判定与分析

唐 磊[1] 邱泽华[2] 李玉江[2] 李 瑜[1] 樊俊屹[1]

1 中国地震台网中心,北京,100045

2 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京,100085

摘 要:四分量钻孔应变观测产出了丰富的近地表连续地壳应变变化资料,使用这些资料时需要正确解析。在四分量钻孔应变观测的力学换算方法基础上,提出了在张-压应力、张应力和压应力3种应力环境下利用四分量钻孔应变观测判定观测区域应力应变状态的方法。以中国青海省门源M 6.9地震为例,用此方法研究了震中附近区域的背景应力应变状态,结果表明应力应变集中区在近地表可能会出现应变拉张现象;分析了门源站主张应变方向的动态变化,初步确定震前5 d出现的主张应变方向变化速率增强现象为震前异常;对四分量钻孔应变记录的同震应变状态与基于弹性位错理论模拟的同震应力场变化特征进行了对比分析,结果表明实测结果与模拟结果吻合度较高。应用分析表明,所提出的判定钻孔观测区域应力应变状态的方法可行有效。

关键词:四分量钻孔应变观测;应变换算;应力应变状态;应变阶;同震应力场

中图分类号:P223 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-06-28

DOI:10.13203/j.whugis20220397 **文章编号**:1671-8860(2025)01-0063-11

Determination and Analysis of Near-Surface Stress-Strain State of 4-Component Borehole Strainmeter

TANG Lei[1] *QIU Zehua*[2] *LI Yujiang*[2] *LI Yu*[1] *FAN Junyi*[1]

1 China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2 National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China

Abstract: **Objectives**: Data on near-surface continuous crustal strain variation are produced in large quantities by the 4-component borehole strainmeter, but correct analysis is needed when using these data. **Methods**: Based on the mechanical conversion method of 4-component borehole strainmeter, we propose a method to determine the stress-strain state by using 4-component borehole strain observations under three stress environments: Tension-compression stress, tension stress, and compression stress. **Results**: Taking the M 6.9 Menyuan earthquake in Qinghai Province, China as an example, we investigate the background stress-strain state near the epicenter by the proposed method. The results show that the stress-strain concentration area may have strain tension near the surface. After analyzing the dynamic change of the strain direction of the Menyuan station, we suggest that the increasing rate of the strain direction change that occurred five days before the earthquake was an anomaly before the earthquake. Following the comparison between the coseismic strain state measured by the borehole strainmeter and the modeled results according to elastic dislocation theory, the results show that the observed results are in good agreement with the modeled results. **Conclusions**: The application analysis shows that the proposed method to determine the stress-strain state of borehole area is feasible and effective.

基金项目:国家自然科学基金(41974018)。

第一作者:唐磊,硕士,高级工程师,主要从事地壳形变与地震预测研究。Tanglei06@seis.ac.cn

Key words: 4-component borehole strainmeter; strain conversion; stress-strain state; strain step; coseismic stress field

自20世纪60年代开始,钻孔应变观测作为研究地壳形变特征与应力场变化的一种形变观测手段,在美国、中国、日本等国家陆续开展[1-6],并被用于板块运动、地震、火山等众多方面的研究[7-10]。中国的钻孔应变观测分为体应变观测和四分量钻孔应变观测,四分量钻孔应变观测始于20世纪80年代,经过30多年的发展和实践,四分量钻孔应变实现了观测自洽[11-12],观测数据质量精度较高[13],精度达10^{-10}量级,能够精确地记录到地震导致的动、静态应变[2]。

一些学者利用四分量钻孔应变观测数据研究了不同地震的异常变化[14-15]、同震响应能力[16-17]、同震应变阶跃[18-21],近几年也应用于面波定震级[22]、地震发震断层和发震构造[9,23-24]、构造应变以及应力应变场[25]等方面的研究。文献[18]基于昌平台四分量钻孔应变观测资料,分析了两次张北地震引起的同震应变阶跃,并估算了相应的应力阶跃;文献[26]研究了地壳应变场观测中体应变与面应变转换系数的计算问题;文献[9,23]基于北天山地区的四分量钻孔应变观测资料分析了呼图壁M 6.2地震的同震应变特征及其对北天山地区构造变形模式的指示;文献[24]利用四分量钻孔应变观测数据研究了呼图壁M 6.2地震的发震断层;文献[25]研究了四分量钻孔应变观测的构造应变速率;文献[27]利用四分量钻孔应变资料分析了远震造成的动态库仑应力变化;文献[28]研究了四分量钻孔应变观测的同震静态应力偏量变化。上述研究均用到了四分量钻孔应变观测数据的力学换算问题,但很少给出利用观测数据判定应力应变状态的具体方法。

文献[29]分析了四分量钻孔应变观测解析中应力与变形的关系,给出了根据观测数据判定应力与变形椭圆关系进而确定主方向的方法。但一些数据使用人员在利用四分量钻孔应变观测数据解析观测区域应力应变状态时,出现了只分析钻孔区域受张-压应力相互作用,忽视了观测区域仅受压应力或仅受张应力作用的情况。为了数据使用人员能正确利用这些数据,本文讨论了在3种应力环境下,如何正确利用四分量钻孔应变观测判定观测区域的应力应变状态;并以门源M 6.9地震为例,研究了震中附近区域2020—2022年的背景应力应变状态,分析了门源站主张应变方向的动态变化和震前异常现象,将四分量钻孔应变记录的同震应变状态与基于弹性位错理论模拟的同震应力场变化特征进行了对比分析。

1 观测原理与概况

四分量钻孔应变观测的是地壳浅地表水平方向的应变变化,如图1(a)所示,在数十米至数百米的钻孔基岩中,沿θ方向安装的元件直接观测的是探头套筒在该方向内径的相对变化S_θ,即元件长度变化量与元件长度之比。S_θ与$(\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varphi)$的关系的计算公式为[12]:

$$S_\theta = A(\varepsilon_1+\varepsilon_2)+B(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\cos 2(\theta-\varphi) \quad (1)$$

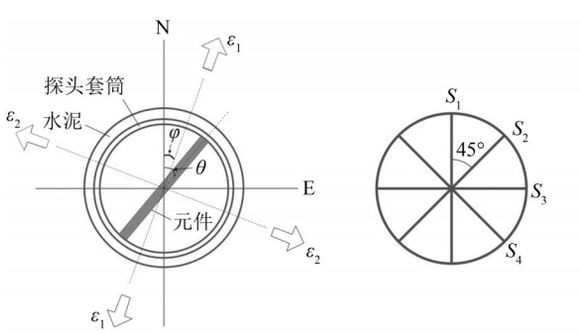
式中,A和B是两个待定常数,称为耦合系数,A和B的大小与套筒的材料和尺寸、水泥的材料和尺寸,以及周围的岩石性质都有着复杂关系;$(\varepsilon_1,\varepsilon_2,\varphi)$是足够远处的应变。

四分量钻孔应变仪共有4个不同方向的元件,如图1(b)所示,元件1为起始,元件2、3、4号按顺时针依次增加45°,其中元件1和元件3垂直,元件2和元件4垂直。用S_1、S_2、S_3和S_4分别表示4个元件的观测值,由式(1)可以分别得到4个元件观测值的表达式,根据二维平面应变观测理论,可得到一个简单而重要的关系[12]:

$$S_1+S_3=S_2+S_4=2A(\varepsilon_1+\varepsilon_2) \quad (2)$$

式中,定义S_1+S_3和S_2+S_4为两组观测面应变。

式(2)表达的关系称为四分量钻孔应变观测的自洽方程或自洽原理,这也是判定四分量钻孔应变观测信度和仪器安装是否成功的重要依据。



(a) 平面应变张量观测原理模型 (b) 四分量钻孔应变元件结构

图1 在钻孔中观测平面应变张量的原理模型和4个元件结构示意图

Fig. 1 Principle Model of Plane Strain Tensor Observed in Boreholes and Schematic Structure of 4 Gauges

截至2021年12月,中国地震地球物理台网共有近70个四分量钻孔应变观测站,包含YRY-4、RZB-2和SKZ-3共3种型号的四分量钻孔应变仪,这些仪器安装在地下数十米至数百米深度的花岗岩、灰岩、石英砂岩等基岩中,通过连续观测钻孔孔径变化来反映钻孔区域的地壳浅地表水平方向的应变变化。大部分仪器安装于“十五”期间,距今已连续运行近15 a,获得了丰富的连续地壳应变变化观测资料,为地震监测预测和地震研究提供了重要基础资料。但如何在不同的领域正确运用这些观测资料还存在很大不足,需要不断丰富和完善观测数据解析方法和应用研究,提升这些观测数据在地壳应力应变和地震研究领域的有效作用。

2　应力应变状态判定方法

2.1　应力与变形分析

四分量钻孔应变观测的是浅地表近地面的线弹性变形,属于二维问题,根据胡克定律,这种钻孔的线弹性变形可以表示为[29]:

$$\begin{cases}\varepsilon_1=\dfrac{1}{E_1}(\sigma_1-v\sigma_2)\\ \varepsilon_2=\dfrac{1}{E_1}(\sigma_2-v\sigma_1)\end{cases}\tag{3}$$

式中,E_1为杨氏模量;v为泊松比;σ_1和σ_2是分别与两个主应变ε_1和ε_2对应的应力,称为最大主应力和最小主应力。

对于钻孔,在所处区域不同应力状态的作用下,钻孔会出现如图2所示的3种变形情况:(1)钻孔区域受张-压应力相互作用,即某个方位受挤压作用,垂直方位受拉张作用,受挤压方位孔径减小,受拉张方位孔径增大(见图2(a));(2)钻孔区域受拉张应力作用,各方位孔径均增大(见图2(b));(3)钻孔区域受挤压应力作用,各方位孔径均减小(见图2(c))。在图2及本文中,实线圆表示某个时刻钻孔未受任何附加应力影响的原始形态,虚线椭圆或圆表示变形后的钻孔;红色箭头代表拉张应力大小及方向,蓝色箭头代表挤压应力大小及方向。一般情况下,这3种变形可呈椭圆形,有明显的椭圆长轴和短轴,但在图2(b)和图2(c)所示的受力作用下,当$\sigma_1=\sigma_2$时,各方位孔径增大或减小幅度一致,变形呈圆形而非椭圆形,分别对应图2(d)、2(e)。这些变形可以全面描述钻孔区域的二维应变状态,而四分量钻孔应变观测可记录到4个不同方向的变形信息,通过分析可得到钻孔区域的应变状态。需要特别说明的是,钻孔应变观测的是地壳应力及应变某时段的相对变化,因此本文的应力应变只是附加应力应变。

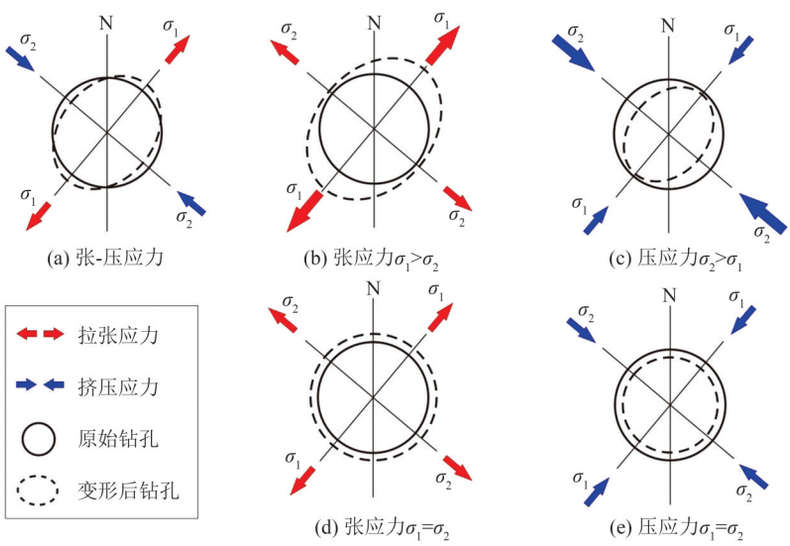


图2　在均匀各向同性介质中应力与变形的关系

Fig. 2　Relationship Between Stress and Deformation in Homogeneous Isotropic Medium

2.2　应力应变与变形关系的判定

平面应变状态只需3个独立分量便可描述钻孔的变形。而四分量钻孔应变仪的相邻元件夹角都是45°,记录了4组观测值,根据平面应变理论,可以从4组观测值中任意挑选3个进行应变换算,可以得到3组应变换算结果,进而得到测点区域的平面应变状态。

对于四分量钻孔应变观测,有一种综合而具有对称性的应变换算方法。根据式(1),设$S_i(i=1,2,3,4)$是观测值,令:

$$\begin{cases} S_{13}=S_1-S_3 \\ S_{24}=S_2-S_4 \\ S_a=(S_1+S_2+S_3+S_4)/2 \end{cases} \tag{4}$$

这样就把4个直接观测值变成了3个间接观测值,就可以用3个已知观测值来唯一地求解3个未知分量值。S_a、S_{13}和S_{24}可称为替代观测值,其中S_a为替代面应变,S_{13}和S_{24}为两组替代剪应变[25]。图3为高台测点各个分量2020年1月至2022年1月的观测值数据和解算的替代观测值曲线。

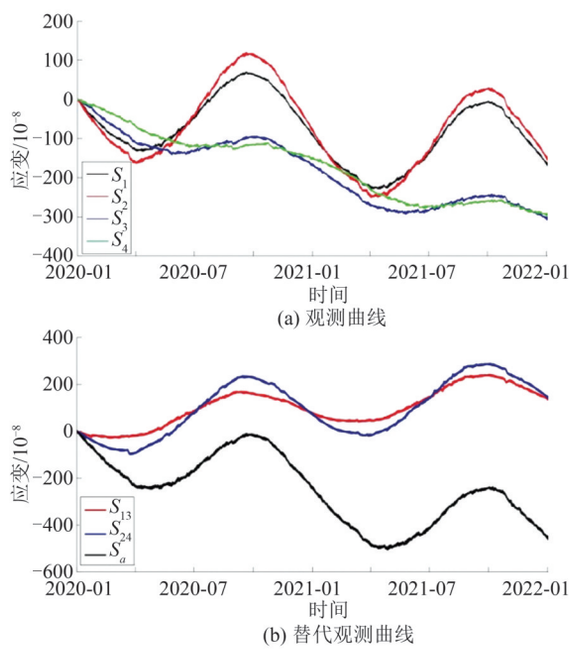


图3 高台观测站的观测值和替代观测值曲线

Fig. 3 Curves of Observation and Substitution Values of Gaotai Station

根据文献[12]的四分量应变观测的应变换算方法,求解主应变(ε_1和ε_2)和主方向φ的计算公式为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1=\dfrac{1}{4A}S_a+\dfrac{1}{4B}\sqrt{{S_{13}}^2+{S_{24}}^2} \\ \varepsilon_2=\dfrac{1}{4A}S_a-\dfrac{1}{4B}\sqrt{{S_{13}}^2+{S_{24}}^2} \\ \varphi=\dfrac{1}{2}\arctan\left(\dfrac{S_{24}}{S_{13}}\right)+\theta_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中,θ_1为1号元件方位。根据三角函数原理,式(5)求解的主方向φ为变形椭圆的长轴方位或短轴方位,如要准确判断钻孔区域的应力应变状态,应首先判断变形椭圆的长轴方位。下文将结合图3所示的3种应力与变形关系,根据主应变ε_1、ε_2、主方向φ和式(4)中的S_{13}和S_{24}数值分别来判定。

1)张-压应力相互作用。若主应变$\varepsilon_1>0$、$\varepsilon_2<0$,或$\varepsilon_1<0$、$\varepsilon_2>0$,说明钻孔区域受图2(a)所示的张-压应力相互作用。在此种情况下,两组替代观测剪应变S_{13}和S_{24}的数值可以出现4种不同组合情况:$S_{13}>0$,$S_{24}>0$;$S_{13}<0$,$S_{24}>0$;$S_{13}>0$,$S_{24}<0$;$S_{13}<0$,$S_{24}<0$。以$S_{13}>0$,$S_{24}>0$的情况为例介绍判断钻孔区域应力应变状态的方法。

在钻孔区域张-压应力的相互作用下,当$S_{13}>0$,$S_{24}>0$时,$S_{13}>0$的物理意义是元件1受拉张而伸长,元件3受挤压而缩短,元件1和元件3的此种变化可以用图4(a)所示的一个假设变形椭圆来表示,其长轴在元件1方位上,短轴在元件3方位上;同理,对于$S_{24}>0$,说明元件2受拉张而伸长,元件4受挤压而缩短,也可以假设一个变形椭圆(图4(b)),其长轴在元件2方位上,短轴在元件4方位上。实际的变形应该是二者的叠加,如图4(c)所示,可以判定,最大变形椭圆的长轴方向应该在元件1与元件2的夹角范围内,即可得到如图4(d)所示的观测站点钻孔变形前后的状态。根据S_{13}和S_{24}量值及φ的大小,可以得到钻孔区域准确的主张应变方向和主压应变方向,结合最大变形椭圆,进而判定观测点的应力应变状态。为了简洁,图4所示的应力应变状态的判定方法可以图5(a)代替。同理,当$S_{13}<0$,$S_{24}>0$时,对应的是图5(b)所示的应力状态;当$S_{13}>0$,$S_{24}<0$时,对应的是图5(c)所示的应力状态;当$S_{13}<0$,$S_{24}<0$时,对应的是图5(d)所示的应力状态。

2)张应力作用。若主应变$\varepsilon_1>0$、$\varepsilon_2>0$,说明钻孔区域为图2(b)所示的情形,即钻孔区域四周均受拉张应力作用。同样地,也可根据两组替代观测剪应变S_{13}、S_{24}和主方向φ判定钻孔的应变状态,如图6所示的在区域受拉张作用下的4组钻孔变形及受力状态。

3)压应力作用。若主应变$\varepsilon_1<0$、$\varepsilon_2<0$,说明钻孔区域处在图2(c)所示的情形,即钻孔区域受压应力作用。同样地,也可根据两组替代观测剪应变S_{13}和S_{24}和主方向φ判定钻孔的应变状态,如图7所示的在区域受挤压作用下的4组钻孔变形及受力状态。

3 应用分析与讨论

在已开展四分量钻孔应变观测的地区,利用这些实测数据通过应力应变状态判定方法可得到区域应力应变状态、应力应变动态变化以及同震应力应变状态等结果,这些结果可进一步应用

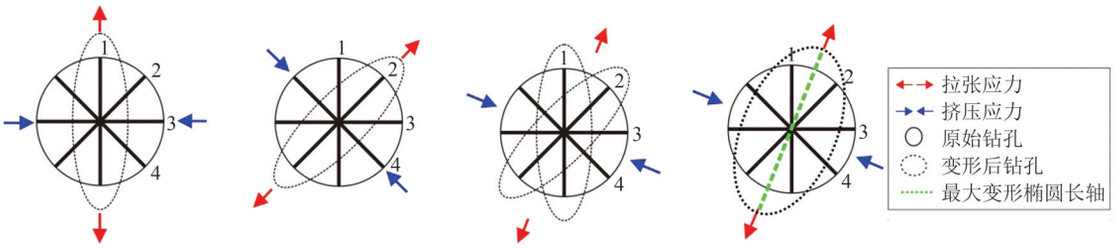


图 4　张-压应力相互作用下 $S_{13}>0$、$S_{24}>0$ 时钻孔区域应力应变状态的判定方法

Fig. 4　Determination Method of Stress-Strain State in Borehole Area Under Tension-Compression Stress Interaction When $S_{13}>0, S_{24}>0$

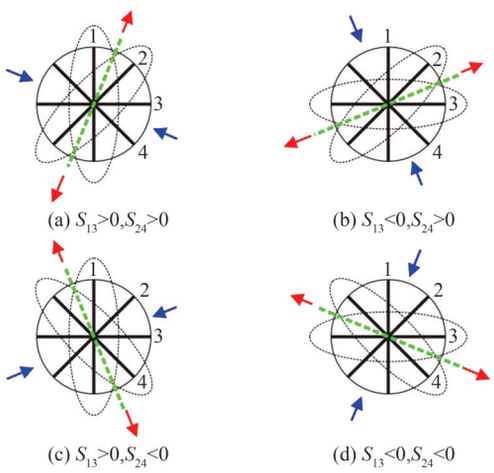


图 5　张-压应力相互作用下钻孔区域应力应变状态的判定

Fig. 5　Determination of Stress-Strain State in Borehole Area Under Tension-Compression Stress Interaction

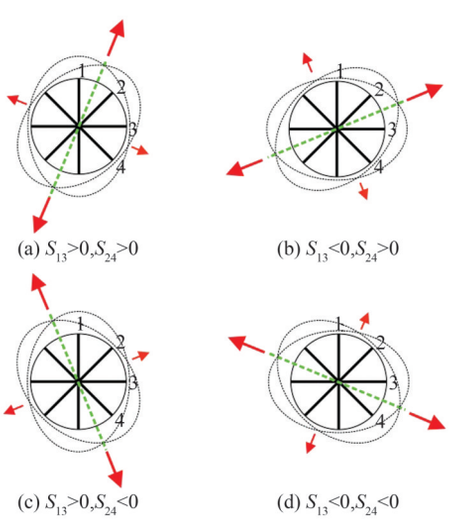


图 6　张应力作用下钻孔区域应力应变状态的判定

Fig. 6　Determination of Stress-Strain State in Borehole Area Under Tension Stress

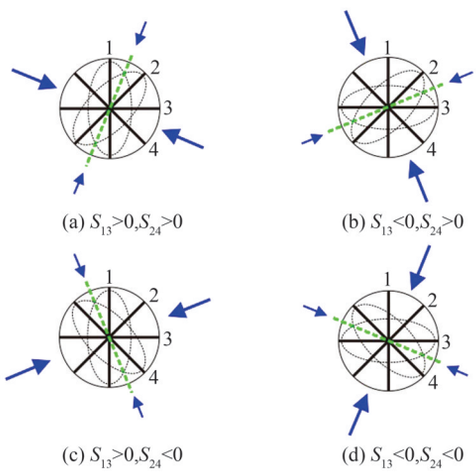


图 7　压应力作用下钻孔区域应力应变状态的判定

Fig. 7　Determination of Stress-Strain State in Borehole Area Under Compression Stress

于地震危险性分析。下文以 2022-01-08 中国青海省门源 M 6.9 地震为例,研究分析四分量钻孔应变观测的区域应力应变状态、应力应变动态变化以及同震应力应变状态,并进行应变状态变化机理讨论。

3.1　区域应力应变状态分析

青海门源 M 6.9 地震震中 300 km 范围内共有门源(61 km)、湟源(124 km)、乐都(169 km)和高台(221 km)4 个四分量钻孔应变观测站,利用这些站点的观测数据,根据式(4)分别计算了 2020 年 1 月至 2022 年 1 月的替代剪应变 S_{13} 和 S_{24},根据式(5)分别计算了主应变 ε_1、ε_2 和主方向 φ。根据本文钻孔区域应力应变状态的判定方法,门源、湟源、乐都和高台 4 个站点所处区域分别符合图 6(b)、图 5(d)、图 7(c)和图 7(a)所示的钻孔受力状态,结合各站点四分量钻孔应变仪 4 个元件的方位,4 个站点的应力应变状态如图 8(a)所示。门源站及附近区域主要受拉张应力作用,主张应变方向约为 N45°E;湟源站及附近区域受张-压应力相互作用,主压应变方向约为 N62°W;乐都站及附近区域受压应力作用,主压应变方向近似 EW 向,约为 N82°E;高台站及附近区域受压应力作用,主压应变方向约为 N45°E。进一步分析认为,在研究时段内,随着震中距增大,4 个观测站所在区域受力状态呈现出相对明显的空间变化

规律:张应力作用—张-压应力相互作用—压应力作用,这种规律反映了门源M 6.9地震附近200 km范围内区域应力应变持续积累,进而引起应力应变集中区近地表发生隆起,致使100 km范围内近地表的区域应力应变状态发生改变,呈现拉张作用。

为对比验证结果可靠性,基于1999—2021年中国大陆全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)观测基准站和区域站的观测数据,计算了研究区域的速度场,采用最小二乘配置方法对GNSS速率结果解算了应变率场,得到了面应变率场结果,如图8(b)所示。速度场结果显示,托莱山断裂-冷龙岭断裂西南向的速度场明显高于北东向,相对应在两条断裂区域形成了面应变压性高值区,但在门源M 6.9震中附近面应变压性减小明显,尤其震中NE向和WS向区域的压性减弱更加明显,面应变率值约为0。

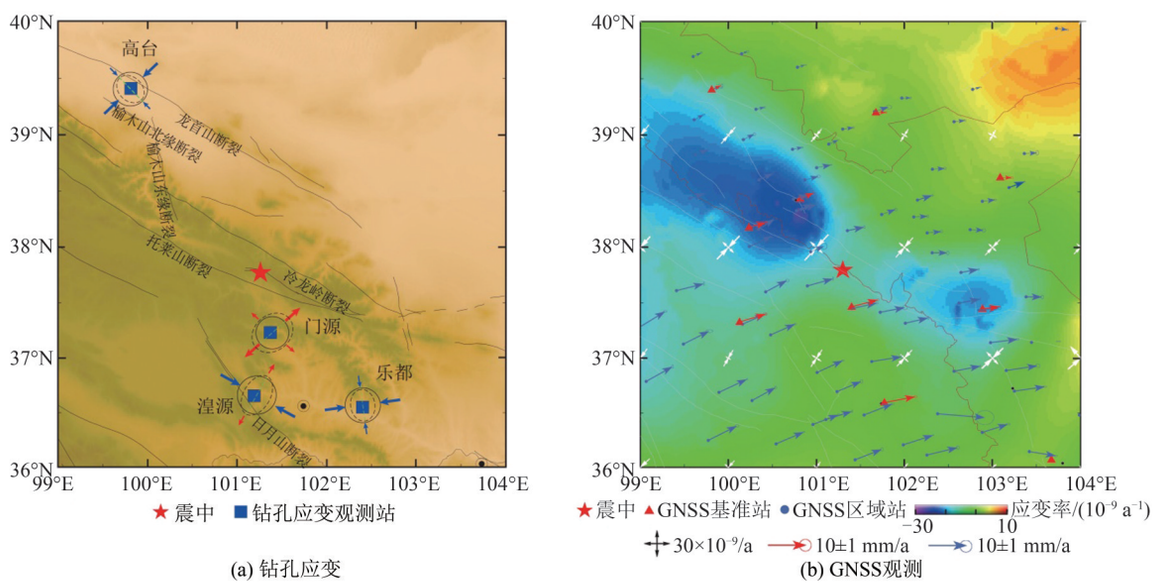


图8 四分量钻孔应变观测的震前应力应变状态和GNSS观测的速度场及面应变场

Fig. 8 Pre-Earthquake Stress-Strain State of 4-Component Borehole Strainmeters and Velocity Field and Plane Strain Field of GNSS

对比图8(a)和8(b),高台、湟源、乐都3个站点所在区域GNSS解算的面应变率也呈压性,但高台压性最明显,门源站所处地区GNSS解算的面应变率值约为0,相对于其他几个观测站,表现为弱压缩应变。GNSS解算的面应变率场结果反映了应力应变集中区地表也发生了隆起现象,需要说明的是,GNSS基准站在门源震中南部200 km范围也仅有2个观测站,解算的应变率场会存在误差,尤其面应变率值约为0时,张压性质会存在判断误差。鉴于本次研究区域只有4个钻孔应变观测站,GNSS基准站也相对较少,研究结果存在局限性,两种观测对比分析还有待深入。

3.2 动态变化分析

以门源观测站为例,本文尝试通过研究钻孔区域的应力应变的动态变化探索震前异常。根据四分量钻孔应变观测数据计算的主应变(图9(a))、替代观测值(图9(b))和主方向(图9(c))等曲线,可知$\varepsilon_1>0$、$\varepsilon_2>0$,$S_{13}<0$、$S_{24}>0$,该台站的钻孔区域在研究时段均符合图6(b)所示的钻孔受力状态,结合门源站四分量钻孔应变仪4个元件的方位,得到4个不同时段的实际受力状态(图9(d))。由图9(d)可知,2020—2022年,门源站钻孔区域处于张性应力区,主张应变方向为NE-SW向。2020年3月的主张应变方向约为N38°E,然后主张应变方向按顺时针变化,2021年1月的主张应变方向约为N48°E,比2020年3月变化了近10°,变化速率约为0.031 (°)/d;之后又呈逆时针变化,至2021年11月底主张应变方向变化了6°,约为N42°E,期间变化速率约为0.019 (°)/d;随后又转折为顺时针变化,2021-12-01—2022-01-04共35 d,顺时针变化约为1°,变化速率约为0.029 (°)/d;但2022-01-04—2022-01-08门源M 6.9地震发生时,主张应变方向顺时针变化速率增强,仅4 d时间变化了近2.5°,变化速率约为0.625 (°)/d(图9(e))。

门源站四分量钻孔应变观测的主张应变方向动态变化结果显示,门源观测站处于张性应力区,2020—2021年主张应变方向在NE-SW向呈

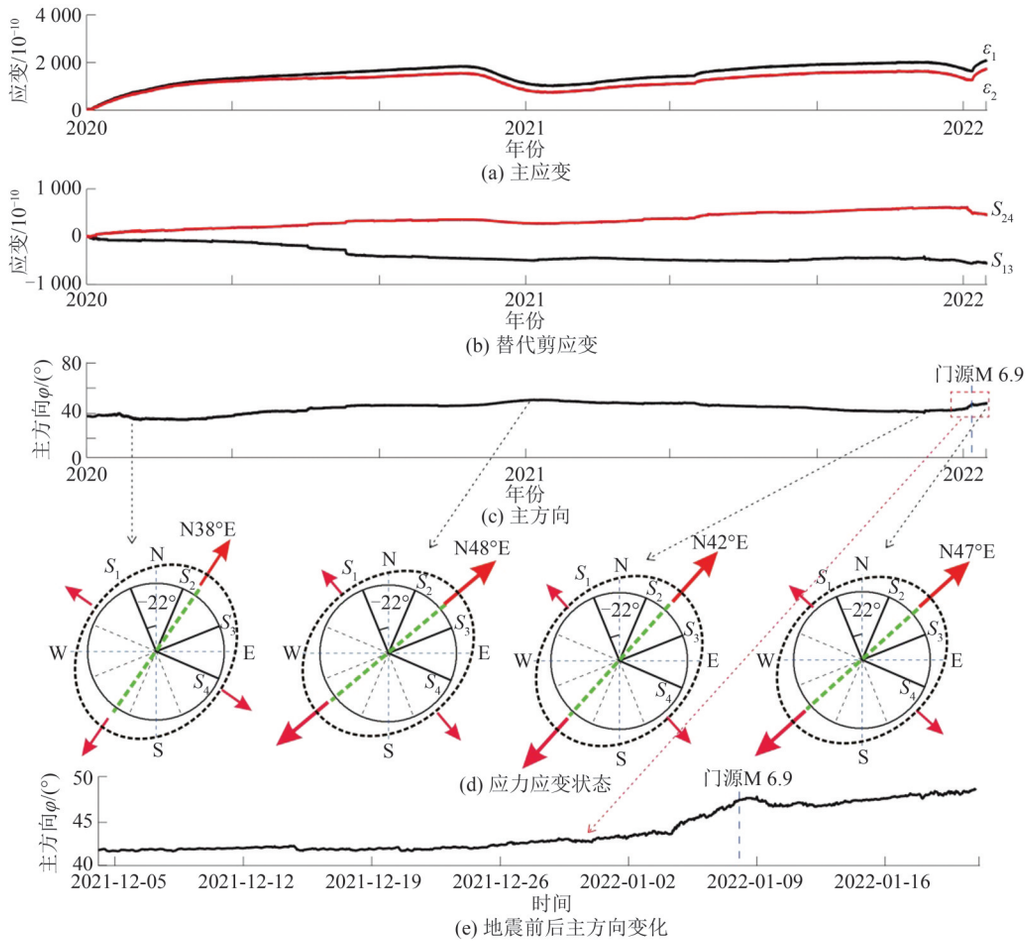


图 9　门源站应变参数时间序列及应力应变状态的动态变化

Fig. 9　Time Series of Strain Parameters and Dynamic Change of Stress－Strain State of Menyuan Station

顺时针和逆时针交替变化,变化速率较为稳定,但震前出现了顺时针快速变化。这一结果说明了该区域地质构造在2020—2021年相对活跃,震前出现的主张方向快速变化,疑为应力快速调整引起,初步判断此种变化可能为门源 M 6.9 地震的震前异常。

3.3　同震应力应变状态分析

地震的发生会引起发震断层附近应力场扰动,并表现出形变观测资料的同震阶跃变化。门源站四分量钻孔应变清晰记录到了门源 M 6.9 地震引起的同震应变阶跃(图 10 中 S_1、S_2、S_3 和 S_4 曲线),与震前观测相比,均为附加的压性变化,说明了此次地震在门源站所处区域引起了压缩影响。根据四分量钻孔应变观测的自洽原理,分析了观测数据的可信度,两组替代面应变同震应变阶的变化性质均为压性,阶跃幅度也基本一致,满足自洽原理(图 10 中 S_1+S_3 和 S_2+S_4 曲线),同震时刻观测数据可信度较高。两组替代剪应变的同震应变阶(图 10 中 S_{13} 和 S_{24})显示,$S_{13}<0$、$S_{24}>0$,同震时刻的应力应变状态符合图 7(b)所示的钻孔受力状态,本文给出了图 11 所示的门源站钻孔的变形和受力状态,结合门源站四分量钻孔应变的方位角,主压应变方向在 NWW-SSE 向。

本文结合余震精定位方法等给出的震源参数[30-32]和门源地震同震破裂模型反演结果[33],基于 Okada 弹性位错理论[34],利用 PSGRN/PSCMP 黏弹性分层模型[35],计算门源地震同震位移场与应力张量变化,给出震源处及邻区同震位移场与应力场变化,如图 11 所示,其中,同震 GNSS 观测数据来源于文献[36]。从模拟给出的同震位移场特征来看(图 11(a)),同震位移场方向在震源区的 EN 侧和 WS 侧表现为指向震中运动,而 WN 侧和 ES 侧则是背向震中运动,运动方向符合典型左旋走滑断层的四象限分布模式,与实际 GNSS 观测资料反映的同震地壳运动特征一致[36]。同时,大多点位的同震位移场大小模拟值与实际观测值一致性较好。图 11(b)是模拟的同震主应力场与钻孔应变实测的同震应力应变状态,从同震主应力场特征来看,门源站附近地区

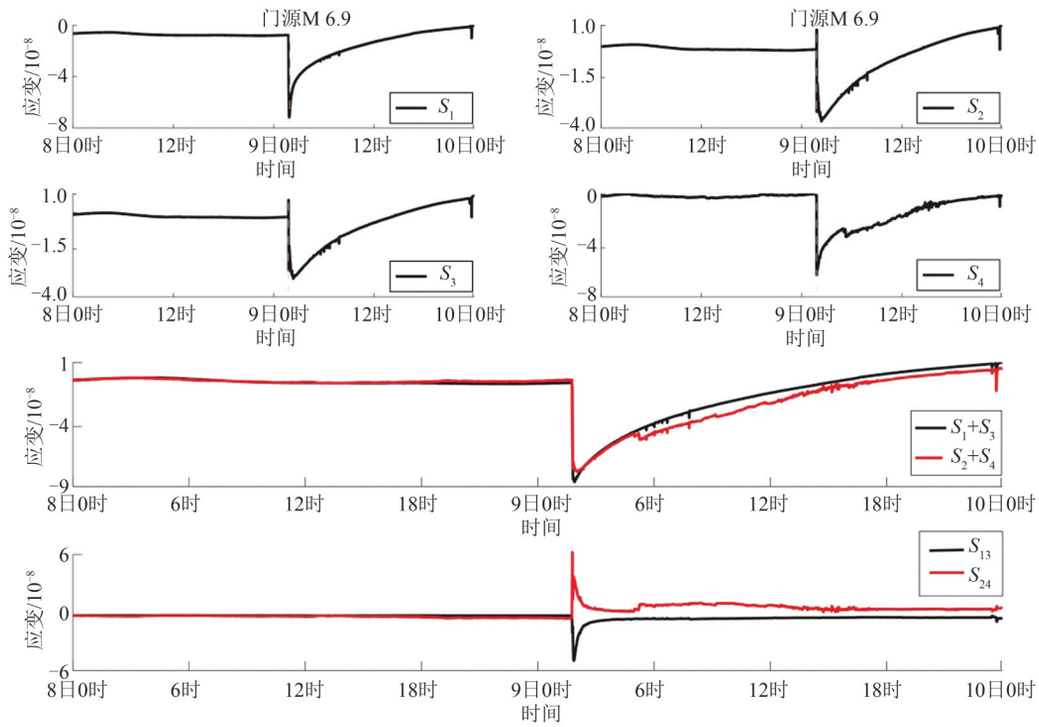
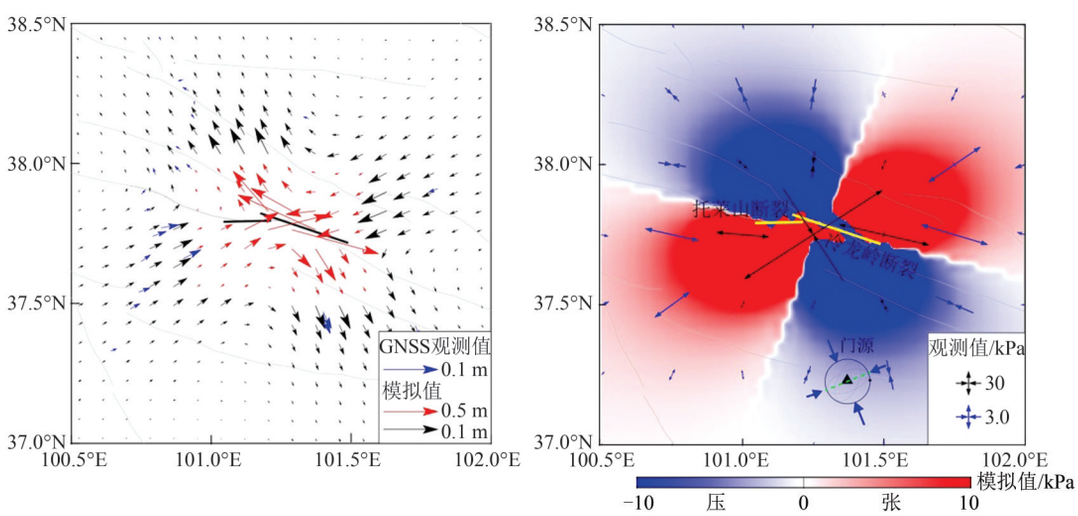


图10 门源4个分量、两组替代面应变和替代剪应变的同震曲线(2022-01-08—2022-01-09)

Fig. 10 Coseismic Curves of 4 Components, 2 Groups of Alternative Plane Strain and Alternative Shear Strain at Menyuan Station(2022-01-08 to 2022-01-09)



(a) 同震位移场模拟值与GNSS观测值 (b) 同震应力场模拟值与观测值

图11 同震位移场、应力场的模拟值与实测值对比分析

Fig. 11 Comparative Analysis of Simulated and Measured Values of Coseismic Displacement Field and Stress Field

的主压应力方向为NWW-SSE向,与四分量钻孔应变观测所反映的同震主应变结果基本吻合。同震主应力场特征可以较好地解释门源站四分量钻孔应变观测同震应变阶跃的张、压性特征,表明在同震应变阶满足自洽原理、数据可靠的情况下,同震应变阶跃可以较好地反映区域同震应力场变化。

4 结 语

安装于地下数十米至数百米基岩的四分量钻孔应变观测,在数据可靠、满足自洽原理的条件下,通过应变换算方法可得到观测区域的应力应变状态。本文在前人研究的基础上,提出了判断观测区域应力应变状态的方法:首先,根据四

分量钻孔应变观测换算的主应变ε_1和ε_2,判断观测区域是受张-压应力相互作用、压应力作用或张应力作用;然后,根据替代剪应变S_{13}和S_{24}判定钻孔变形情况,确定变形椭圆大致形态;最后,根据应变换算的主方向φ判定观测区域的应力应变状态。该方法可以较准确地判定四分量钻孔应变观测区域近地表的应力应变状态,可与GNSS观测联合为地震危险性分析提供参考。

基于门源M 6.9地震附近区域的四分量钻孔应变观测,研究了门源、湟源、乐都和高台4个观测站的应力应变状态及空间变化规律,地震震中附近较远区域应力应变持续积累,进而引起应力应变集中区近地表发生隆起现象,致使震中地区近地表的区域应力应变状态发生改变,呈现拉张作用,并与GNSS观测解算的速度场和面应变率场进行了对比分析,发现虽然存在一定误差,但总体特征较类似。这种现象是否出现在其他地震,未来还需要研究更多的区域和震例,并且研究区域要有相对较多的观测站。

对门源站四分量钻孔应变观测的主张应变方向动态变化进行分析,发现门源观测站所处的区域地质构造在2020—2021年相对活跃,震前出现的主张应变方向快速变化,疑为构造应力快速调整引起,初步判断此种变化可能为门源M 6.9地震的震前异常。

四分量钻孔应变观测的同震应变阶变化特征,与根据震源参数、基于Okada弹性位错理论模拟的同震应力场变化特征基本一致,实测结果与模拟结果基本吻合。研究结果进一步说明模拟的同震主应力场特征能较好地解释四分量钻孔应变观测同震应变阶跃的张、压性特征,在同震应变阶满足自洽原理的条件下,得到的同震应变状态可以作为区域同震应力场的实测依据。

参　考　文　献

[1] SACKS I S, SUYEHIRO S, EVERTSON D W. Sacks-Evertson Strainmeter, Its Installation in Japan and Some Preliminary Results Concerning Strain Steps[J]. *Proceedings of the Japan Academy*, 1971, 47(9): 707-712.

[2] 欧阳祖熙, 张宗润, 舒桂林. 中国西部钻孔应变仪台网工作回顾与前瞻[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(23): 4058-4062.
OUYANG Zuxi, ZHANG Zongrun, SHU Guilin. Review and Outlook for West China Borehole Strainmeter Networks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(23): 4058-4062.

[3] 苏恺之. 液位型体积式应变仪的工作原理[J]. 地震科学研究, 1982(4): 57.
SU Kaizhi. Working Principle of Liquid Level Volumetric Strain Gauge[J]. *Seismological Research*, 1982(4): 57.

[4] 池顺良. 用于地层应力-应变观测的压容式钻孔应变仪[J]. 地震, 1985, 5(3): 18-22.
CHI Shunliang. Pressure Capacitive Borehole Strain Gauge for Formation Stress-Strain Observation[J]. *Earthquake*, 1985, 5(3): 18-22.

[5] GLADWIN M T, GWYTHER R L, HART R H G, et al. Measurements of the Strain Field Associated with Episodic Creep Events on the San Andreas Fault at San Juan Bautista, California[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1994, 99(B3): 4559-4565.

[6] ISHII H. Development of New Multi-component Borehole Instrument[R]. Ranmaru City, Japan: Report of Tono Research Institute of Earthquake Science, 2001.

[7] LINDE A T, GLADWIN M T, JOHNSTON M J S, et al. A Slow Earthquake Sequence on the San Andreas Fault[J]. *Nature*, 1996, 383: 65-68.

[8] BARBOUR A J, AGNEW D C, WYATT F K. Coseismic Strains on Plate Boundary Observatory Borehole Strainmeters in Southern California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, 105(1): 431-444.

[9] GONG Z, JING Y, LI H B, et al. Static-Dynamic Strain Response to the 2016 M 6.2 Hutubi Earthquake (Eastern Tien Shan, NW China) Recorded in a Borehole Strainmeter Network[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 183: 103958.

[10] 吕品姬, 李正媛, 孙伶俐, 等. 2022年汤加火山喷发对中国大陆地应变观测的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 927-933.
LÜ Pinji, LI Zhengyuan, SUN Lingli, et al. Analysis of Impact of the Tonga Volcanic Eruption in 2022 on the Strain Observation of Chinese Mainland[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 927-933.

[11] 石耀霖, 范桃园. 地应力观测井中元件标定及应力场计算方法[J]. 地震, 2000, 20(2): 101-106.
SHI Yaolin, FAN Taoyuan. Borehole in Situ Calibration of Stress Sensors and Calculation of Variation of Stress Field During Long Term Observation[J]. *Earthquake*, 2000, 20(2): 101-106.

[12] QIU Z H, TANG L, ZHANG B H, et al. In Situ Calibration of and Algorithm for Strain Monitoring

Using Four-Gauge Borehole Strainmeters (FGBS)[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2013, 118(4): 1609-1618.

[13] 唐磊, 邱泽华, 宋茉. 钻孔四分量应变观测自检内精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(S2): 36-39.
TANG Lei, QIU Zehua, SONG Mo. Self-test Accuracy of 4-Component Borehole Strain Observation [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(S2): 36-39.

[14] 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 等. 汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(8): 1031-1039.
QIU Zehua, ZHANG Baohong, CHI Shunliang, et al. Abnormal Strain Changes Observed at Guzan Station Before Wenchuan Earthquake [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2010, 40(8): 1031-1039.

[15] 刘琦, 张晶, 池顺良, 等. 2013年芦山Ms 7.0地震前后姑咱台四分量钻孔应变时频特征分析[J]. 地震学报, 2014, 36(5): 770-779.
LIU Qi, ZHANG Jing, CHI Shunliang, et al. Time-Frequency Characteristics of Four-Component Borehole Strain at Guzan Station Before and After 2013 Lushan Ms7.0 Earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2014, 36(5): 770-779.

[16] 李玉丽, 安黎霞, 李启雷, 等. 格尔木地震台钻孔应变仪映震性能分析[J]. 地震研究, 2014, 37(S1): 83-87.
LI Yuli, AN Lixia, LI Qilei, et al. Analysis on Earthquake Response Ability of the Borehole Strain Meter in Golmud Seismic Station[J]. *Journal of Seismological Research*, 2014, 37(S1): 83-87.

[17] 师娅芳, 孙宗强, 师家升, 等. 滇黔地区钻孔应变观测记震能力研究[J]. 国际地震动态, 2015, 45(1): 8-14.
SHI Yafang, SUN Zongqiang, SHI Jiasheng, et al. Research on the Earthquake Responding Ability of Borehole Strain Observation in Yunnan-Guizhou Region, China [J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2015, 45(1): 8-14.

[18] 邱泽华, 石耀霖. 观测应变阶在地震应力触发研究中的应用[J]. 地震学报, 2004, 26(5): 481-488.
QIU Zehua, SHI Yaolin. Application of Observed Strain Steps to the Study of Remote Earthquake Stress Triggering [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(5): 481-488.

[19] 唐磊, 邱泽华, 郭燕平, 等. 日本9.0级地震引起的应变阶分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2011, 32(6): 13-16.
TANG Lei, QIU Zehua, GUO Yanping, et al. An Analysis on Strain Step Caused by Ms 9.0 Earthquake in Japan [J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2011, 32(6): 13-16.

[20] 唐磊, 荆燕. 川滇地区钻孔四分量应变仪记录的同震应变阶分析[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(4): 370-376.
TANG Lei, JING Yan. Analysis of Coseismic Strain Step Observed by 4-Component Borehole Strain Meters in Sichuan-Yunnan Region [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2013, 8(4): 370-376.

[21] 董培育, 任天翔, 杨少华, 等. 钻孔应变观测同震阶变时的一个问题及对策分析[J]. 地质力学学报, 2015, 21(3): 359-370.
DONG Peiyu, REN Tianxiang, YANG Shaohua, et al. A Problem and Explanation for Borehole Strain Meter Records of Co-seismic Strain Steps[J]. *Journal of Geomechanics*, 2015, 21(3): 359-370.

[22] 李富珍, 张怀, 唐磊, 等. 基于钻孔应变地震波记录确定地震面波应变震级[J]. 地球物理学报, 2021, 64(5): 1620-1631.
LI Fuzhen, ZHANG Huai, TANG Lei, et al. Determination of Seismic Surface Wave Strain Magnitude Based on Borehole Strain Seismic Wave Records [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(5): 1620-1631.

[23] 龚正, 李海兵, 荆燕, 等. 2016年M 6.2呼图壁地震发震构造及其对天山构造带隆升的启示:来自中近场钻孔应变观测的证据[J]. 地球物理学报, 2020, 63(4): 1386-1402.
GONG Zheng, LI Haibing, JING Yan, et al. Seismogenic Structure of the 2016 M 6.2 Hutubi Earthquake and Its Implication for the Uplift Process in Tian Shan: Evidence from Borehole Strainmeters in the Near to Intermediate Field [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(4): 1386-1402.

[24] LI Y J, ZHANG H P, TANG L, et al. Seismogenic Faulting of the 2016 Mw 6.0 Hutubi Earthquake in the Northern Tien Shan Region: Constraints from Near-Field Borehole Strain Step Observations and Numerical Simulations[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2020, 8: 588304.

[25] 邱泽华, 唐磊, 郭燕平, 等. 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, 2020, 35(5): 1688-1701.
QIU Zehua, TANG Lei, GUO Yanping, et al. Observing Tectonic Strain Rates using Four-Gauge-Borehole-Strainmeters(FGBS)[J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(5): 1688-1701.

[26] 张凌空, 牛安福, 吴利军. 地壳应变场观测中体应

变与面应变转换系数的计算[J]. 地震学报, 2012, 34(4):476-486.
ZHANG Lingkong, NIU Anfu, WU Lijun. Conversion Factors from Volume to Area Strain in Crustal Strain Observation [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2012,34(4): 476-486.

[27] 李富珍,任天翔,池顺良,等. 基于钻孔应变观测资料分析远震造成的动态库仑应力变化[J]. 地球物理学报,2021,64(6): 1949-1974.
LI Fuzhen, REN Tianxiang, CHI Shunliang, et al. The Dynamic Coulomb Stress Changes Caused by Remote Earthquakes Based on the Borehole Strainmeter Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(6):1949-1974.

[28] 石耀霖, 尹迪, 任天翔, 等. 首次直接观测到与理论预测一致的同震静态应力偏量变化: 2016年4月7日山西原平ML 4.7地震的钻孔应变观测[J]. 地球物理学报, 2021,64(6): 1937-1948.
SHI Yaolin, YIN Di, REN Tianxiang, et al. The Variation of Coseismic Static Stress Deviation Consistent with Theoretical Prediction was Observed for the First Time: Observation of Borehole Strain of the Yuanping ML 4.7 Earthquake in Shanxi on April 7, 2016[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(6): 1937-1948.

[29] 邱泽华. 钻孔应变观测理论和应用[M]. 北京: 地震出版社, 2017.
QIU Zehua. Borehole Strain Observation, Theory and Application[M]. Beijing: Seismological Press, 2017.

[30] 韩立波. 2022年青海门源Ms 6.9地震震源机制解[J]. 地震科学进展, 2022, 52(2): 49-54.
HAN Libo. Focal Mechanism of 2022 Menyuan Ms 6.9 Earthquake in Qinghai Province[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2022,52(2): 49-54.

[31] 许英才,郭祥云,冯丽丽. 2022年1月8日青海门源Ms 6.9地震序列重定位和震源机制解研究[J]. 地震学报,2022,44(2):195-210.
XU Yingcai, GUO Xiangyun, FENG Lili. Relocation and Focal Mechanism Solutions of the Ms 6.9 Menyuan Earthquake Sequence on January 8, 2022 in Qinghai Province [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2022,44(2):195-210.

[32] 李智敏,盖海龙,李鑫,等. 2022年青海门源Ms 6.9级地震发震构造和地表破裂初步调查[J]. 地质学报,2022,96(1):330-335.
LI Zhimin, GAI Hailong, LI Xin, et al. Seismogenic Fault and Coseismic Surface Deformation of the Menyuan Ms 6.9 Earthquake in Qinghai, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022,96(1):330-335.

[33] LI Y S, JIANG W L, LI Y J, et al. Coseismic Rupture Model and Tectonic Implications of the January 7, 2022, Menyuan Mw 6.6 Earthquake Constraints from InSAR Observations and Field Investigation [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(9):2111.

[34] OKADA Y. Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1985, 75(4): 1135-1154.

[35] WANG R J, LORENZO-MARTÍN F, ROTH F. PSGRN/PSCMP: A New Code for Calculating Co- and Post-Seismic Deformation, Geoid and Gravity Changes Based on the Viscoelastic-Gravitational Dislocation Theory[J]. *Computers & Geosciences*, 2006,32(4): 527-541.

[36] 李煜航, 梁诗明, 郝明, 等. 2022年1月8日门源Ms 6.9地震同震位移场及其发震断层形变破裂特征[J]. 地球物理学报, 2023,66(2):589-601.
LI Yuhang, LIANG Shiming, HAO Ming, et al. Coseismic Displacement Field of Menyuan Ms 6.9 Earthquake on January 8, 2022 and Its Implications for Rupture Characters of Seismogenic Faults [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(2): 589-601.