

樊俊屹,刘高川,2021. 3 种钻孔应变仪记录的玛多 $M_s 7.4$ 地震同震响应特征对比分析. 中国地震,37(3):564~573.

3 种钻孔应变仪记录的玛多 $M_s 7.4$ 地震 同震响应特征对比分析

樊俊屹 刘高川

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 针对 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s 7.4$ 地震,采用 3 种型号的钻孔应变仪观测到的应变资料对比分析同震应变波,结果表明 3 种仪器记录同震的初动时间、波动幅度和持续时间等存在一定差别:在震中距相当的情况下,TJ 型体应变仪和 RZB 型四分量钻孔应变仪存在波动幅度变化小、持续时间短的问题,难以从背景变化中区分同震响应,影响钻孔仪器同震规律研究;YRY-4 型四分量钻孔应变仪波动幅度变化大,持续时间长,在映震效果上表现较为突出。

关键词: 玛多 $M_s 7.4$ 地震 钻孔分量应变 体应变 同震变化

[文章编号] 1001-4683(2021)03-0564-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

钻孔应变地震监测技术是监测地层内部应变状态随时间连续变化的一种精细观测技术,该技术利用安装在地下钻孔中的钻孔应变仪来观测地壳表层应变,可掌握地震应变前兆的(长)中期、短期、临震以及震后调整的时、空分布与发展变化的规律。钻孔应变观测对象分为体应变和分量应变,体应变反应的是钻孔周围岩石体应变变化,分量应变反应的是钻孔中水平应变状态的变化。地震发生时,断层破裂活动可能会引起观测台站所在地的应力场发生张、压性变化,钻孔应变仪会记录到同震变化,震级越大,同震变化越明显。研究同震波动变化与地震的关系,有利于对前兆现象的认识和理解,对于减轻次生灾害、追溯地震前兆、跟踪后续地震以及研究地壳活动规律等均具有理论和实际意义。国内外已经开展的科研工作显示,当全球发生 7 级以上地震时,我国的各类钻孔应变仪器,大多可以观测到地震引起的波动。邱泽华等(2005、2006、2007)首先利用体应变记录到的同震资料,对昆仑山 $M_s 8.1$ 地震和苏门答腊 $M_s 8.7$ 地震引起的同震应力触发断层活动进行了研究;唐磊等(2011、2013)利用中国钻孔应变台网记录的 93 个台站同震变化资料,分析了中国大陆主要活动断裂可能受到日本 $M_s 9.0$ 地震的影响程度,以及利用川滇地区的 6 套分量应变仪记录到的同震变化,对汶川 $M_s 8.0$ 和芦山 $M_s 7.0$ 地震的同震应变阶进行了分析。分析钻孔应变同震阶

[收稿日期] 2021-07-20 [修定日期] 2021-08-20

[项目类别] 中国地震台网中心青年基金(QNJJ202118)资助

[作者简介] 樊俊屹,女,1986 年生,工程师,主要从事地壳形变数据质量和跟踪分析研究。E-mail: fjiy1112@yeah.net

刘高川,通讯作者,男,1982 年生,高级工程师,主要从事地震地球物理观测技术研究。E-mail: chnlgc@126.com

变,探讨同震应变阶的可靠性及影响因素,研究震源过程、应力触发、地球自由振荡等问题,从而进一步探讨研究区域的构造应力释放情况,分析研究区域未来的地震危险性。

2021 年 5 月 22 日 2 时 4 分青海果洛藏族自治州玛多县 ($34.63^{\circ}\text{N}, 98.52^{\circ}\text{E}$) 发生 $M_s7.4$ 地震,震中位于巴颜喀拉块体,距离此次地震震中最近的断层是甘德南缘断裂带。震源机制为走滑型破裂(邓文泽,2021),结合巴颜喀拉块体内部广泛发育的不同级别的 NW-SE 向的左旋走滑断裂系,说明东侧区域断裂系构造应力作用处于较强闭锁状态,区域构造背景应力水平相对较高,且由震源机制解正演获得地震同震造成的应变场显示,震中东、西两侧区域分别处于较强的挤压和拉张状态,该区域地壳结构整体处于一种“东紧西松”的状态^①。我国钻孔应变监测台网中的钻孔应变仪记录到本次地震的响应特征各有差异,因此本文对比了 TJ 型钻孔体应变、YRY-4 型分量钻孔应变仪和 RZB 型分量钻孔应变仪这 3 种在网钻孔应变仪的同震应变波,分析 3 种仪器的同震响应特征和能力,为今后仪器的定型入网提供参考。

1 在网钻孔应变观测仪器

目前纳入中国地震局地球物理台网数据库的钻孔应变仪包括 TJ 型钻孔体应变仪 72 套、YRY-4 型分量钻孔应变仪 36 套、RZB 型分量钻孔应变仪 29 套(下文中分别简称为体应变仪、YRY 型应变仪和 RZB 型应变仪),空间分布如图 1 所示。体应变仪主要集中在中东部地区,YRY 型应变仪主要集中在青海、四川、云南、山西和江苏等地,RZB 型应变仪主要集中在新疆、甘肃、重庆、山东和广东等地。

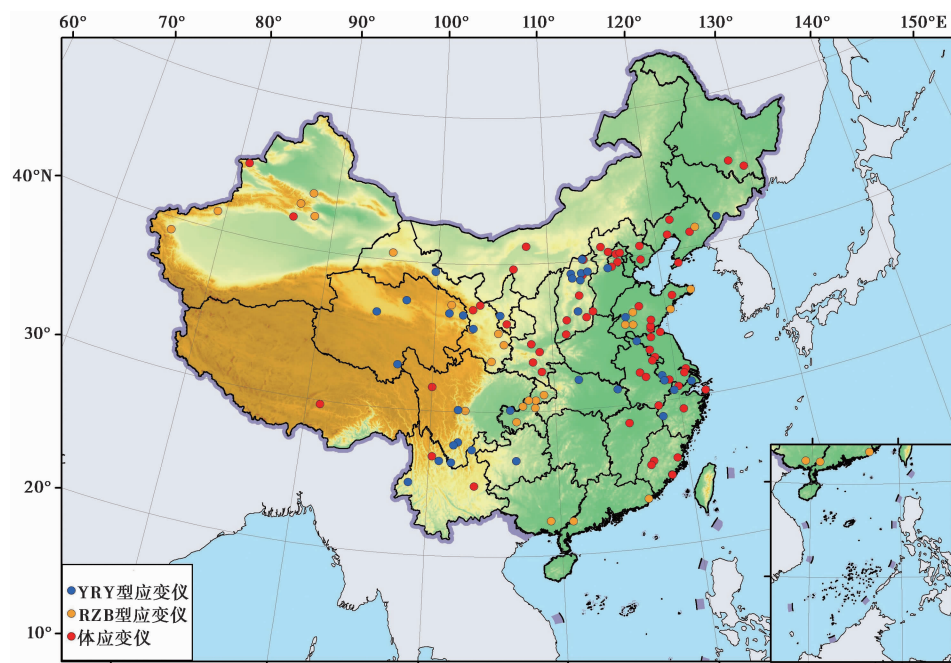


图 1 3 种钻孔应变仪空间分布

^① 李瑜,2021. 私人通讯.

2 青海玛多 $M_s7.4$ 地震引起的钻孔应变同震变化特征

钻孔应变观测的同震效应是指地震波传播到钻孔应变观测点所激发的近场局部应力应变的变化。为了方便对比分析,将分量钻孔应变仪的观测值通过换算得出面应变值(邱泽华等,2009),与体应变仪观测值进行对比。地震引起的钻孔应变同震变化有振荡和阶变2种类型(郑江蓉等,2013;杨绍富等,2013;王小娟,2015)。

(1)振荡型:一般由远震引起,表现为钻孔应变快速高频振荡、快速高频衰减,钻孔应变振荡持续时间、波动幅度与震级呈正比关系,持续时间为几十分钟至几小时,振荡幅度为 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ 应变。玛多 $M_s7.4$ 地震引起的地应变振荡型变化特征如图2所示。

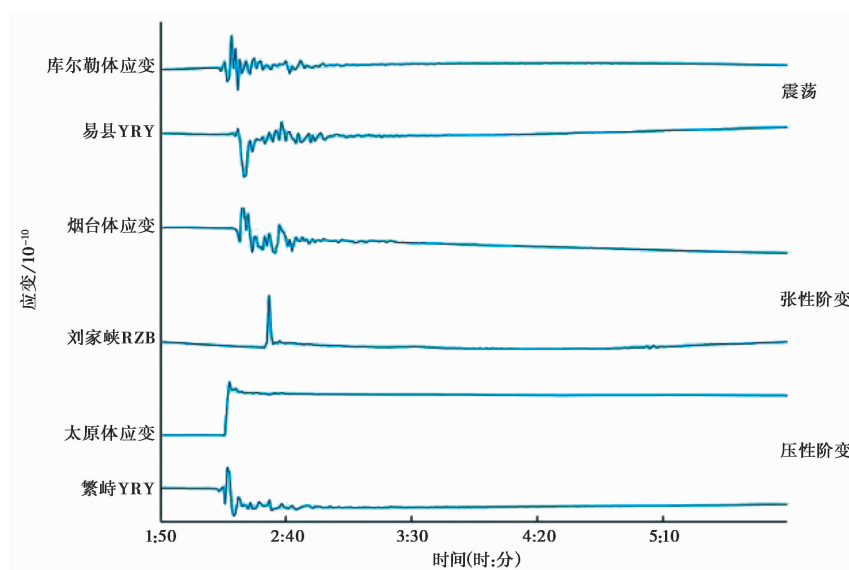
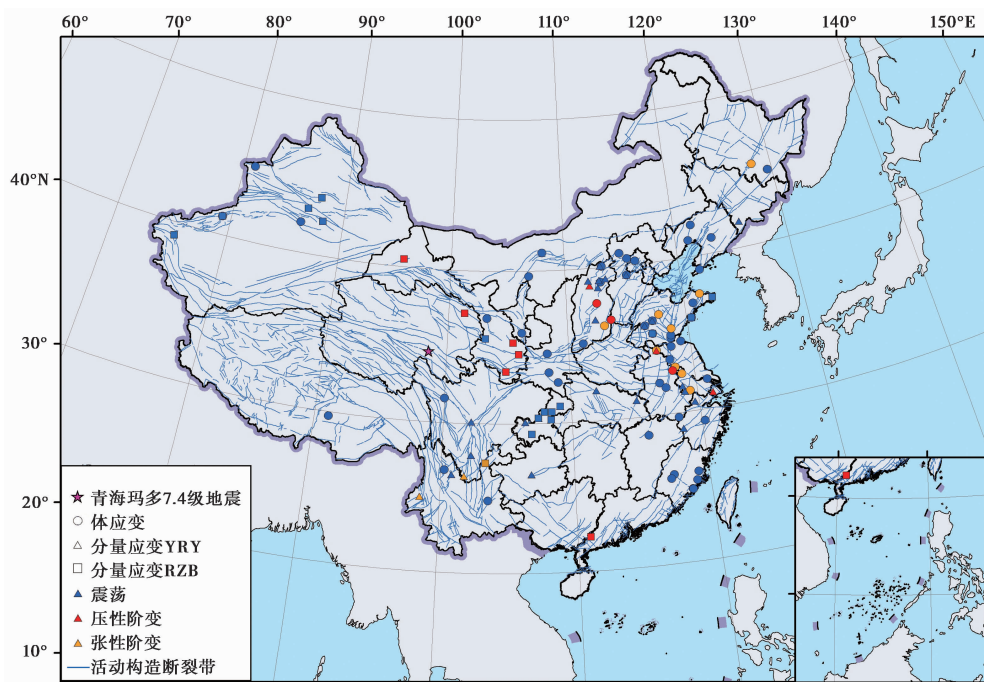


图2 典型同震曲线

(2)阶变型:一般由地方震及近地震引起或大震对较远观测的应力触发引起,表现为地震波引起钻孔应变变化出现压性阶变、张性阶变,持续时间及幅度亦与震级有关。幅度为 $10^{-9} \sim 10^{-6}$ 应变,持续时间为几十分钟至几小时,有时甚至产生永久性的应变阶变。

玛多 $M_s7.4$ 地震引起的钻孔观测的张性阶变变化特征及压性阶变变化特征如图2所示。通过初步分析可知,同震初到时间、波动幅度、持续时间表现出一定的相关性,但同震阶变等方面差异明显,这可能和地震波的传播路径、台站地质环境、钻孔与岩石的耦合及仪器自身特性有关。

此次地震在全国范围共引起117个钻孔应变测点发生同震响应(图3),其中包括56个分量钻孔应变测点和61个体应变测点。在56个分量应变测点中,10个测点的分量钻孔应变为压性阶变,3个测点为张性阶变,43个测点为振荡型变化;在分量应变测点中,震中距最近的为青海德令哈台,约为322km,波动幅度约 22168.5×10^{-10} ;震中距最远的为吉林通化台,约2543km,波动幅度约 3217.6×10^{-10} 。按照波动幅度变化分析,波动幅度最大的是震中距2009km的江苏常熟台,约 31790.5×10^{-10} ;波动幅度最小的为震中距约971km的重庆垫

图3 青海玛多 $M_s7.4$ 地震钻孔应变同震响应分布

江新民台,其波动幅度仅 5.7×10^{-10} 。

在 61 个体应变测点中,同震变化表现为压性阶变的测点有 3 个,表现为张性阶变的有 9 个,表现为振荡型变化的有 49 个。震中距最近的为四川甘孜台,约 366km,波动幅度约 3257×10^{-10} 。震中距最远的为黑龙江牡丹江,约 2901km,波动幅度约 19.7×10^{-10} 。按照波动幅度变化分析,波动幅度最大的为震中距 1728km 的江苏徐州台,幅度约为 89732×10^{-10} ,波动幅度最小的为震中距最远的黑龙江牡丹江台,其波动幅度仅为 197×10^{-10} 。

钻孔应变观测的同震变化在空间分布上具有明显的集聚特征,震中距在 500km 范围内多呈现振荡变化。RZB 型应变仪多呈现压性阶变,主要分布在震中的东侧,震中距在 700km 范围内,与震源机制解正演应变场结果一致;YRY 型应变仪表现为同震压性阶变的分布范围较广,震中距在 1300~2100km 范围内;体应变仪同震张性阶变较为集中的区域为山东和江苏,震中距在 1700~2000km 范围内;3 种仪器同震振荡的测点分布范围广,震中距为 322~2901km 不等,集聚性特征不明显。

3 3 种仪器震中距与同震响应量关系

为进一步说明 3 种仪器的不同响应特征,分析了 3 种钻孔应变仪器对青海玛多地震同震响应的波动幅度、初动时间、持续时间、频率等多个参量的关联性。

3.1 响应波动幅度

分析钻孔应变仪器响应波动幅度变化与震中距的关系发现:

(1) 震中 500km 范围内,YRY 型应变仪响应明显;震中距大于 500km 时,3 种仪器响应波动幅度变化较为接近。



(2) YRY 型和 RZB 型应变仪在震中距 1500km 以上的波动幅度大于震中距 500~1000km 范围内的波动幅度,且大部分 YRY 型应变仪的响应波动幅度大于 RZB 型应变仪。

(3) 体应变仪波动幅度变化与震中距的相关性较另 2 种仪器高(表 1)。

表 1 钻孔应变仪器波动幅度变化与震中距的相关系数

仪器	相关系数
体应变仪	0.2167
YRY 型应变仪	0.0333
RZB 型应变仪	-0.1838

3.2 响应时间

同震响应最早的台站是体应变仪的云南陆良台、内蒙古乌加河台、山东相公庄台、山东长清台, YRY 型应变仪的海原小山台, RZB 型应变仪的乌什台。使用体应变仪的台站中,同震响应最晚的是西藏拉萨台和河北张家口台,在震后 16min 才开始响应;使用 YRY 型应变仪的台站中最晚响应的是上海松江佘山台,在震后 11min 开始响应;使用 RZB 型应变仪的台站中响应最晚的是山东青岛台和甘肃刘家峡台,震后 26min 开始响应。

通过对仪器响应时间与震中距关系的分析发现:震中距 500km 内, YRY 型应变仪响应最早。震中距 500~1000km 范围内, YRY 型应变仪响应最快,体应变仪次之, RZB 型应变仪最慢;震中距 1000~2000km 范围内, 3 种仪器响应速度持平;震中距大于 2000km 时,大部分体应变仪响应早于其他仪器。

为了更好地对比分析 3 种类型仪器在玛多地震中表现出的同震变化,根据震中距大小,选取震中距相近且 3 种类型仪器均存在的区域,按由近及远进行分段,通过综合对比分析,初步结果如下:

(1) 在震中距 300~500km 范围内,符合条件的有 8 套仪器(表 2),其中 YRY 型应变仪观测到的同震波动幅度最大,体应变仪波动幅度次之, RZB 型应变仪波动幅度最小;同震响应的持续时间基本相同; RZB 型应变仪和体应变仪可能存在授时问题,记录的此次地震的初动时间与理论值差别较大。

表 2 震中距 300~500km 范围内 3 种仪器的响应对比

台站名称	仪器名	响应量			
		震中距/km	初动时间/min	持续时间/min	波动幅度/ 10^{-10}
甘孜台	YRY 型应变仪	366	130	192	3257
德令哈台		322	126	206	22168.5
湟源台		345	126	196	18501.5
南山口台		375	127	236	23577.6
乐都台		427	128	193	11555.8
临夏台		465	128	197	27132.9
门源台	RZB 型应变仪	400	127	193	102.2
刘家峡台		450	150	223	1438.1

(2)震中距 900~1000km 范围内,符合条件的有 6 套仪器,其中体应变仪波动幅度变化最大,YRY 型应变仪次之;有 2 套 RZB 型应变仪和 1 套体应变仪的波动幅度变化极小,难以从背景变化中进行区分,这 3 套仪器的地震响应持续时间较短;YRY 型应变仪和 1 套体应变仪持续时间较长。

(3)震中距 1000~1100km 范围内,符合条件的有 6 套仪器,其中 RZB 型应变仪波动幅度变化最大,体应变仪次之;有 2 套 RZB 型应变仪波动幅度变化极小,难以从背景变化中进行区分,还有 1 套仪器虽然波动幅度变化较大,但难以从背景变化中区分出持续响应变化,这 3 套仪器地震响应持续时间较短;YRY 型应变仪持续时间较长。

(4)震中距 1350~1405km 范围内,符合条件的有 7 套仪器,其中体应变仪波动幅度变化最大,2 种分量应变仪次之;有 1 套体应变仪持续时间较短,虽然初始波动幅度变化值大,但后续变化幅度小,难以从背景变化中进行区分,这套仪器的地震响应持续时间较短;其他仪器持续时间较长。

(5)震中距 1643~1651km 范围内,符合条件的有 4 套仪器,其中体应变仪波动幅度变化最大,RZB 型应变仪次之;有 1 套体应变仪和 1 套 RZB 型应变仪持续时间较短,虽然波动幅度变化值大,但难以从背景变化中区分出持续响应变化,地震响应持续时间较短;其他仪器影响持续时间较长。

(6)震中距 1699~1728km 范围内,符合条件的有 8 套仪器,其中体应变仪波动幅度变化最大,YRY 型应变仪次之;有 1 套体应变仪持续时间较短,虽然波动幅度变化值大,但难以从背景变化中区分出持续响应变化,地震响应持续时间较短;其他仪器影响持续时间长。

(7)震中距 2169~2236km 范围内,符合条件的有 8 套仪器,其中 RZB 型应变仪波动幅度变化最大;体应变仪和 YRY 型应变仪持续时间较短,虽然波动幅度变化值大,但难以从背景变化中区分出持续响应变化,地震响应持续时间短;其他仪器影响持续时间较长。

另外,还选取同一台站有 2 种类型仪器的山西大同台、山东泰安台、江苏徐州台和青海高台台 4 个台站,进行了综合对比分析,其中高台台的 2 种仪器为 YRY 型应变仪和测震宽频带地震仪。由图 4 和表 3 所示,①大同台和泰安台的 2 套仪器初动时间相同,徐州台的 YRY 型应变仪比体应变仪晚 1min,高台台的宽频带地震仪比 YRY 型应变仪早 1min;②大同台和徐州台 YRY 型应变仪的持续时间大于体应变仪,泰安台体应变仪的持续时间大于 RZB 型应变仪,测震仪器的持续时间大于 YRY 型应变仪。

对比响应波形发现同一台站的 2 种仪器存在差异,3 个震中距大于 1000km 台站的体应变仪的波动幅度大于分量应变仪器,说明体应变仪的敏感度较高,接收到地震波动后引起的振幅变化较大,但并未清晰地反应实际波动情况。徐州台的体应变仪表现的是张性阶变,而 YRY 型应变仪表现的是压性阶变,这些差别可能与仪器性能、参量设置、场地响应有关。宽频带地震仪初动时间仅早于 YRY 型应变仪 1min,由于 YRY 型应变仪为分钟值采样,接收到的地震信号延迟 1min 响应;宽频带地震仪的持续时间大于 YRY 型应变仪 21min,说明 YRY 型应变仪的同震变化持续时间是相对完整有效的,而宽频带地震仪采用率高,观测到的信号比 YRY 型应变仪丰富。

3.3 响应频率

钻孔应变频谱分析的常规方法是时频类分析方法,该方法可以较方便地进行信号频谱

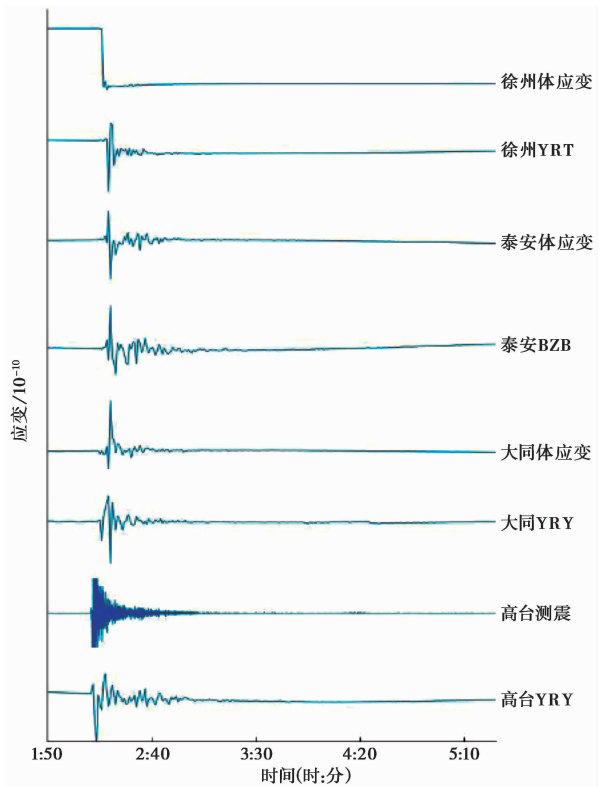


图 4 同台站不同仪器曲线对比

表 3 同台站不同仪器响应对比

台站名	仪器名	震中距/km	初动时间/min	持续时间/min
大同台	体应变仪	1441	128	183
	YRY 型应变仪		128	198
泰安台	体应变仪	1712	131	191
	RZB 型应变仪		131	186
徐州台	体应变仪	1728	132	72
	YRY 型应变仪		133	165
高台台	宽频带地震仪	552	125	234
	YRY 型应变仪		126	213

的动态研究(刘琦等,2011、2013、2014;李文军等,2014)。常用的时频类分析方法较多,包括短时傅立叶变换、Gabor 展开、小波变换、wignel-ville 分布、Cohen 类分布等方法,本文选用连续小波变换 CWT 方法,从频率域方面研究 3 种观测仪器记录的同震响应。连续小波变换具有频带更为连续的特点,特别适合全局时频特征的总体把握,可以反映在整个同震时段的频谱演变整体特性(侯海龙,2007)。选取同时有 2 种以上仪器观测的山西大同台、山东泰安台和江苏徐州台 3 个台站,采用上述时频分析方法,分别绘制了 3 个台站记录的此次地震的同震变化时段的时频曲线,如图 5 所示。综合分析认为,3 种仪器对此次地震的响应频带存

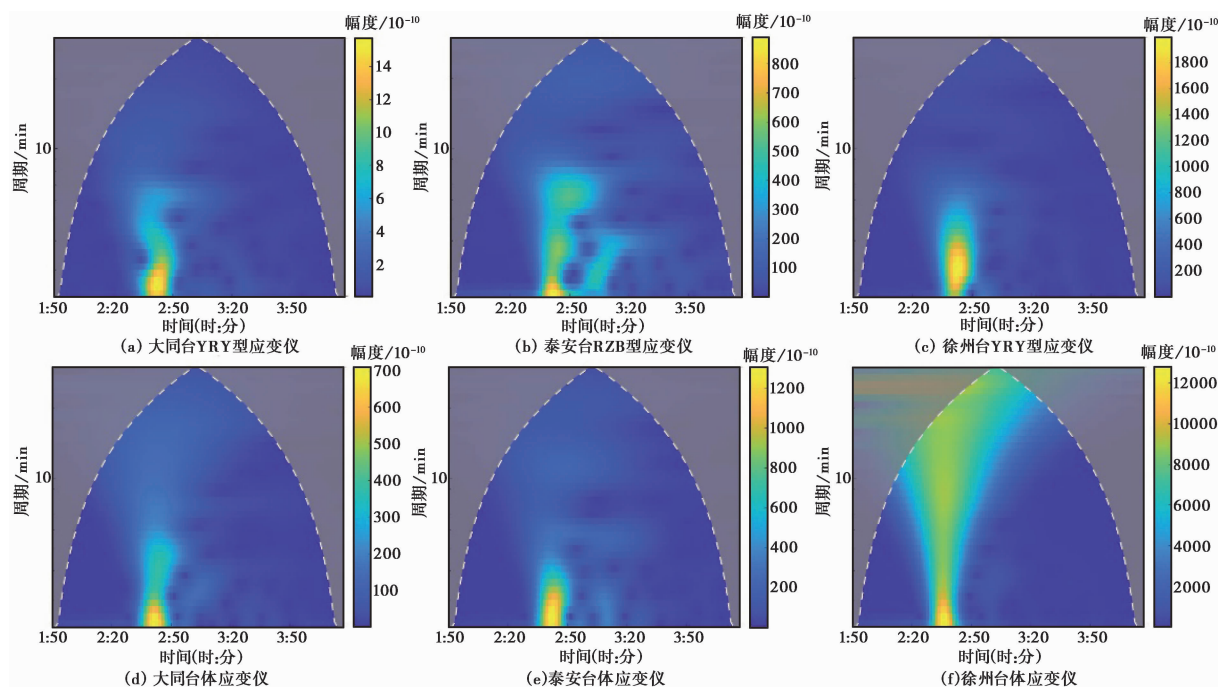


图5 同一台站3种观测仪器的同震时频对比
白色虚线为影响锥

在差别,大同台 YRY 型应变仪的主要频带为 2~4min,体应变仪为 2~3min,YRY 型应变仪记录的频带较宽;泰安台 RZB 型应变仪的主要频带为 2~3min,体应变仪为 2~4min,RZB 型应变仪记录的频带范围非常小,体应变仪记录的频带较宽;徐州台 YRY 型应变仪的主要频带为 2~5min,体应变仪为 2~3min,YRY 型应变仪记录的频带也较宽。分析认为,可能是观测点介质的各向异性造成了观测点场地局部的应变差异。对比发现,同一台站 2 种仪器的同震响应的频带差别较大,可能与仪器性能、参量设置、场地响应和钻孔与有关。但总体上来说,YRY 型应变仪记录的频带范围最大,体应变仪次之,RZB 型应变仪最小,说明 YRY 型应变仪记录同震信息的能力最强。

3.4 多个参量相关性特征分析

进一步分析多个参量的相关性,分别从数据分布和斜率来对比震中距、初动时间、持续时间与波动幅度之间的关系(胡春美,2019)。由各参量之间关系的矩阵图(图6)可知:①在震中距 1000km 范围内,3 种仪器数量相当;②YRY 型应变仪的同震响应的初动时间最早,RZB 型应变仪次之,体应变仪最晚,但体应变仪和 RZB 型应变仪存在响应滞后情况,这可能与仪器自身性能有关,也可能与仪器的 GPS 授时有关;③在同震变化持续时间上,约有一半的 RZB 型应变仪和体应变仪持续时间较短,仅少部分 YRY 型应变仪持续时间较短,由于观测信号变化幅度减弱,使其后期的同震响应与余震或背景变化重合,已无法区分;④RZB 型应变仪在波动幅度上的变化是 3 种仪器中最小的。

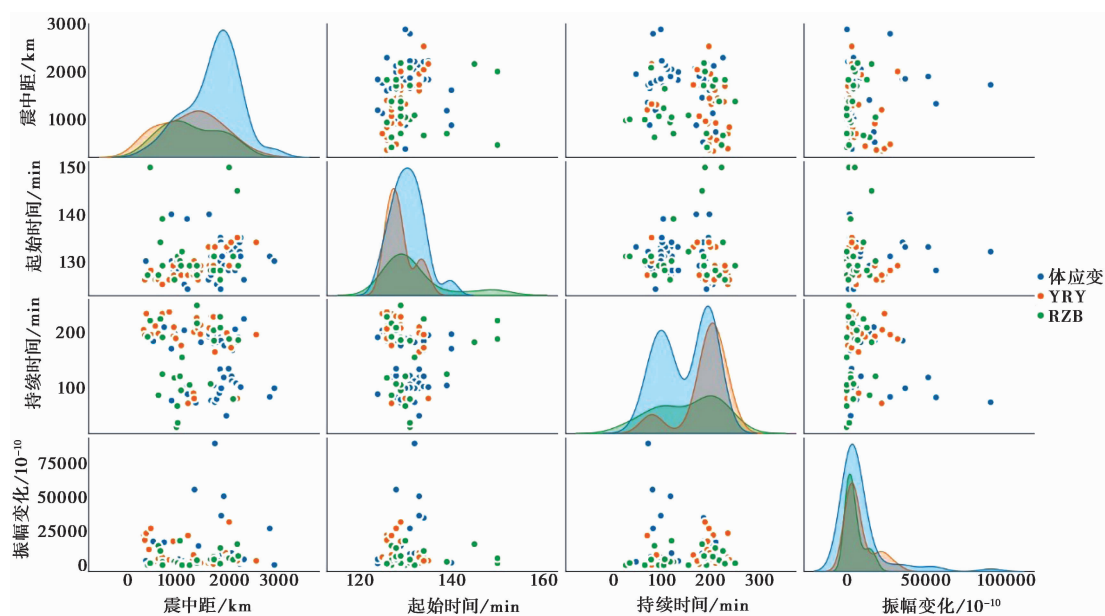


图6 3种仪器的震中距与初动时间、持续时间、波动幅度关系

4 结论

通过对3种钻孔应变仪记录的玛多 $M_s7.4$ 地震的同震响应特征进行分析,初步得出以下结论:

(1)在震中距700km范围内,RZB型应变仪的记录多呈现压性阶变,主要分布在震中的东侧,与震源机制解正演应变场结果一致。

(2)YRY型应变仪的开始响应时间早于RZB型应变仪和体应变仪,体应变仪和RZB型应变仪存在响应滞后现象,此次地震中,部分仪器的初动时间与理论初动时间差别较大,可能与仪器GPS授时有关;约有一半的RZB型应变仪和体应变仪的同震变化持续时间较短,仅少部分YRY型应变仪持续时间较短,说明YRY型应变仪记录的同震变化信息更丰富。

(3)全国所有台站的钻孔应变仪均记录到青海玛多 $M_s7.4$ 地震的同震响应,但RZB型应变仪记录的波动幅度变化最小,变化幅度与震中距相关性也最小。

(4)3种型号的仪器记录的同震响应频带存在差别,可能是观测点介质的各向异性造成了观测点场地局部的应变差异,但总体来说,YRY型应变仪记录同震信息的能力最强。

总体上,钻孔应变仪观测记录同震变化的初动时间、波动幅度和持续时间等与震中距存在一定的关系,但在同震应变阶、张压性变化等方面差异较大,造成此差异的原因尚需进一步研究。

致谢: 中国地震台网中心李瑜提供了利用GNSS计算出的玛多地震区域构造背景应力,在此表示衷心感谢!

参考文献

- 邓文泽,杨志高,席楠,等, 2021. 2020 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震, **37**(2): 541~550.
- 侯海龙, 2007. 连续小波变换在地震时频分析中的应用. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 胡春美, 2019. 数据挖掘技术在鸢尾花数据集上的应用. 计算机产品与流通, (10): 173.
- 邱泽华,石耀霖,欧阳祖熙, 2005. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定. 大地测量与地球动力学, **25**(1): 118~122.
- 李文军,张晶,刘琦,等, 2014. 2012 年印尼 8.6 级地震应变地震波的 Hilbert-Huang 时频分析. 地震, **34**(2): 45~54.
- 刘琦,张晶, 2011. S 变换在汶川地震前后应变变化分析中的应用. 大地测量与地球动力学, **31**(4): 6~9.
- 刘琦,张晶,池顺良,等, 2014. 2013 年芦山 $M_s7.0$ 地震前后姑咱台四分量钻孔应变时频特征分析. 地震学报, **36**(5): 770~779.
- 刘琦,张晶,晏锐,等, 2013. 高采样率四分量钻孔应变同震响应分析. 中国地震, **29**(1): 57~67.
- 邱泽华,阚宝祥,唐磊, 2009. 四分量钻孔应变观测资料的换算和使用. 地震, **29**(4): 83~89.
- 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. 地震学报, **28**(6): 596~602.
- 邱泽华,唐磊,阚宝祥,等, 2007. 用钻孔应变观测研究北京地区活断层的现今活动. 地震地质, **29**(4): 716~728.
- 唐磊,邱泽华,郭燕平,等, 2011. 日本 9.0 级地震引起的应变阶分析. 地震地磁观测与研究, **32**(6): 13~16.
- 唐磊,荆燕, 2013. 川滇地区钻孔四分量应变仪记录的同震应变阶分析. 震灾防御技术, **8**(4): 370~376.
- 王小娟, 2015. 甘肃地区分量钻孔应变仪记录的尼泊尔 $M_s8.1$ 地震同震变化特征分析. 甘肃科技, **31**(22): 48~50, 29.
- 杨绍富,徐长银,孙海军, 2013. 新疆钻孔应变对汶川 8.0 和日本 9.0 级地震的同震响应特征分析. 华南地震, **33**(1): 43~48.
- 郑江蓉,王俊,梅卫萍,等, 2013. 汶川 8.0 级地震时徐州台地震动和形变同震响应分析. 防灾减灾工程学报, **33**(1): 108~113.

Comparative Analysis of Coseismic Response Characteristics from Three Borehole Strain Gauges Recorded for the Maduo $M_s7.4$ Earthquake

Fan Junyi Liu Gaochuan

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract In view of the $M_s7.4$ Maduo earthquake in Qinghai Province on May 22, 2021, the coseismic strain waves observed by three types of borehole strain gauges are compared and analyzed. the results show that there exist some differences in the initial motion time, fluctuation amplitude and duration recorded by the three instruments. In the case of the same epicentral distance, TJ type bulk strain gauge and RZB type four-component borehole strain gauge are not good of small fluctuation range and short duration, which makes it difficult to distinguish the coseismic response from the background change, affecting the coseismic law of borehole instrument. the YRY-4 four-component borehole strain gauge has a large fluctuation range and a long duration, and has outstanding performance in seismic reflection effect.

Keywords: Maduo $M_s7.4$ earthquake; Drilling component strain; Body strain; Coseismic changes