

辛建村,孙君嵩,于晨,等.门源 $M_s 6.9$ 地震前地电场优势方位角与加卸载响应比异常变化分析[J].地震工程学报,2022,44(2):415-424.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220124002

XIN Jiancun,SUN Junsong,YU Chen,et al.Abnormal variation of dominant azimuth and load/unload response ratio of geoelectric field before the Menyuan $M_s 6.9$ earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2022,44(2):415-424.DOI:10.20000/j.1000-0844.20220124002

门源 $M_s 6.9$ 地震前地电场优势方位角与 加卸载响应比异常变化分析

辛建村¹, 孙君嵩², 于 晨³, 方 炜¹, 赵 杰¹, 杨宜海¹

(1. 陕西省地震局,陕西 西安 710068; 2. 江苏省地震局,江苏 南京 210014; 3. 中国地震台网中心,北京 100045)

摘要: 2022年1月8日在青海门源县发生 $M_s 6.9$ 地震,基于震中 300 km 范围内地电场近 5 年观测资料,综合分析选取 9 个观测站,根据大地电场岩体裂隙水(电荷)渗流(移动)模型计算其优势方位角,并尝试以地电场为响应量,通过库仑应力触发模型的加卸载响应比(LURR)计算方法,计算地电场 LURR 值。结果显示:(1)两种不同方法计算的地电场异常站在空间分布上具有一致性,其中古丰、黄羊川、寺滩和兰州站地电场优势方位角、LURR 在震前皆出现异常变化,而山丹等其他站方位角、LURR 均看不出明显的异常变化。(2)兰州和寺滩站两种计算方法的结果时序变化较为吻合,表现出准同步性。进一步结合震源机制解对异常观测站优势方位与区域主压应力 P 走向的关联进行分析,结果表明基本符合岩石物理学理论,这在一定程度上可增强地电场优势方位角方法在分析地震前兆异常中的可信度。地电场优势方位角以及 LURR 值两种计算方法在机理上具有关联性,综合分析其异常演化特征可能有助于进一步认知地震孕育的物理过程。

关键词: 门源 $M_s 6.9$ 地震; 地电场; 优势方位角; 加卸载响应比; 主压应力 P 走向

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2022)02-0415-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220124002

Abnormal variation of dominant azimuth and load/unload response ratio of geoelectric field before the Menyuan $M_s 6.9$ earthquake

XIN Jiancun¹, SUN Junsong², YU Chen³, FANG Wei¹, ZHAO Jie¹, YANG Yihai¹

(1. Shaanxi Earthquake Agency, Xian 710068, Shaanxi, China; 2. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, Jiangsu, China;
3. China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China)

Abstract: An $M_s 6.9$ earthquake occurred in Menyuan County, Qinghai Province on January 8, 2022. Based on the observation data of the electric field within 300 km of the epicenter in recent 5

收稿日期:2022-01-24

基金项目:国家自然科学基金(42004048);陕西省自然科学基础研究计划(2020JQ-979)

第一作者简介:辛建村(1990—),男,工程师,主要从事地震前兆观测、数据分析处理等工作。E-mail:970989479@qq.com。

通信作者:杨宜海(1988—),男,博士,副研究员,主要从事地震各向异性、构造应力场和壳幔速度结构研究。

E-mail: yangyh529@163.com。

years, 9 observation stations were analyzed and selected. According to the seepage (movement) model of rock fissure water (charge), the dominant azimuth of the geoelectric field was calculated. The loading and unloading response ratio (LURR) value of the geoelectric field was calculated through the LURR calculation method of Coulomb stress-triggered model. The results showed that: (1) The stations with geoelectric field anomalies calculated by the two different methods are consistent in spatial distribution. Among them, the dominant azimuth and LURR of the geoelectric field at Gufeng, Huangyangchuan, Sitan, and Lanzhou stations showed abnormal changes before the earthquake, while those at Shandan and other stations did not show obvious anomalies. (2) The time series changes of Lanzhou and Sitan stations using the two calculation methods are consistent, showing quasi synchronization. Combined with the focal mechanism solution, the correlation between the dominant azimuth of abnormal stations and the principal compressive stress P-axis direction was analyzed, and the results basically conform to the petrophysics theory. The two calculation methods of geoelectric field dominant azimuth and LURR value are related in mechanism, and a comprehensive analysis of their abnormal evolution characteristics may help to further understand the physical process of earthquake preparation.

Keywords: Menyuan M_s 6.9 earthquake; geoelectric field; dominant azimuth; loading and unloading response ratio; the principal compressive stress P-axis direction

0 引言

人类在 19 世纪初已经观测到了地球表面存在电流。我国是世界上唯一开展大规模、规范化地震地电场观测的国家,迄今超过 110 余个地电场站分布在全国主要活动断裂带及其附近,这为地震监测预报研究提供了可贵的数据资料。

地电场是重要的地球物理场,其观测数据包含了大地电场、自然电场和干扰成分^[1]。近几年,相关研究成果表明大地电场不仅起源于空间电流系,其日变波形还跟日、月潮汐作用相关^[2-5]。基于这一认识,岩体裂隙水中的电荷是在 S_q 电流感应作用下以日为周期移动,或裂隙水在潮汐力作用下以日为周期渗流形成大地电场日变波形主体,由此建立了大地电场的岩体裂隙水(电荷)渗流(移动)模型^[5]。在地下介质应力积累过程中会导致岩体裂隙结构变化,从而使得大地电场的强度或方向发生变化。因此,理论上通过研究大地电场也能够开展地震预测尝试,地电场优势方位角方法便由此提出。近些年,基于地电场优势方位角这一方法,研究人员也初步总结了一些典型震例^[5-12],这对推动地电场学科在地震预测中的发展和应用或多或少都有意义。

加卸载响应比(LURR)计算方法是在 20 世纪 80 年代基于岩石应力与应变的非线性响应提出的地震预测方法^[13-15],用来度量地壳介质的损伤程度。理论上

任何能够反映孕震区介质损伤、失稳过程的地球物理量均可以作为响应量。孕震过程中,剧烈的区域构造活动常导致场地应力应变、地下流体的运移状态等发生变化,地表电磁信息与岩体形变、流体渗流的过程密切关联,因此这种变化通常在地电场观测数据中得以体现^[5,16-19]。于晨等^[18]以地电场为响应量,尝试计算了 2020 年 6 月 26 日于田 M_s 6.4 地震前和田地电场观测站 LURR 异常时序曲线,结果表明该站在地震前 1~3 个月出现了 LURR 异常逐渐增大的同步变化。

据中国地震台网中心(CENC)测定,北京时间 2022 年 1 月 8 日 1 时 45 分在青海海北州门源县(37.77° N, 101.26° E)发生 M_s 6.9 地震,震源深度 10 km。本文拟基于震中周围地电场近 5 年观测资料,采用地电场优势方位角^[5]以及以地电场为响应量的库仑应力触发模型加卸载响应比计算方法^[19],结合震源机制解对地电场异常变化现象进行初步分析讨论,总结地电场优势方位角的异常特征,探索加卸载响应比在地电场资料中的应用,旨在进一步认知地震孕育的物理过程。

1 地电场资料分析

1.1 观测数据

中国大陆地电场通常采用两个正交方位(NS 与 EW)及一个斜向(N 45° W 或 N 45° E)进行布设观

测, 各测道产出数据为分钟值(1 次/min)。如图 1 所示, 2022 年 1 月 8 日青海门源 $M_s 6.9$ 地震震中 300 km 范围内地电场观测站共 12 个, 其中松山站有两个测点。由于红沙湾站自 2017 年 1 月停测, 拦

隆口站自 2020 年 5 月停测, 门源站正式投入观测不足 3 年(2020 年开始观测), 因此本文中未对红沙湾、拦隆口和门源站观测数据进行分析(图 1 中未绘出红沙湾、拦隆口、门源等 3 站)。

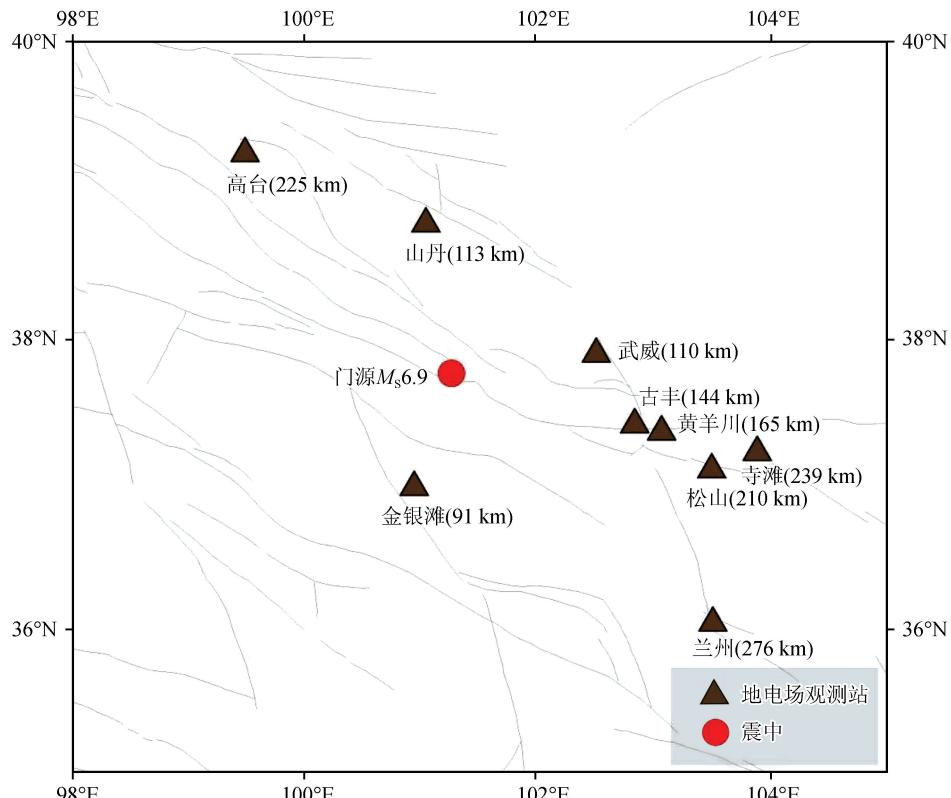


图 1 青海门源 $M_s 6.9$ 地震震中 300 km 范围内地电场站分布图

Fig.1 Distribution of geoelectric field stations within 300 km of the epicenter of Menyuan $M_s 6.9$ earthquake in Qinghai

对高台等 9 个地电场观测站 2017 年至 2022 年 1 月 31 日地电场数据的可用性进行统计并绘制图 2 [松山的两个站点分别为松山 1 和松山 3(1、3 为测

点号)], 图中以天为统计单位, 其中数据可用时段是观测系统正常或数据经过处理、综合评估后可用, 若当天观测缺数超过 1 小时(60 个观测值), 则当天按

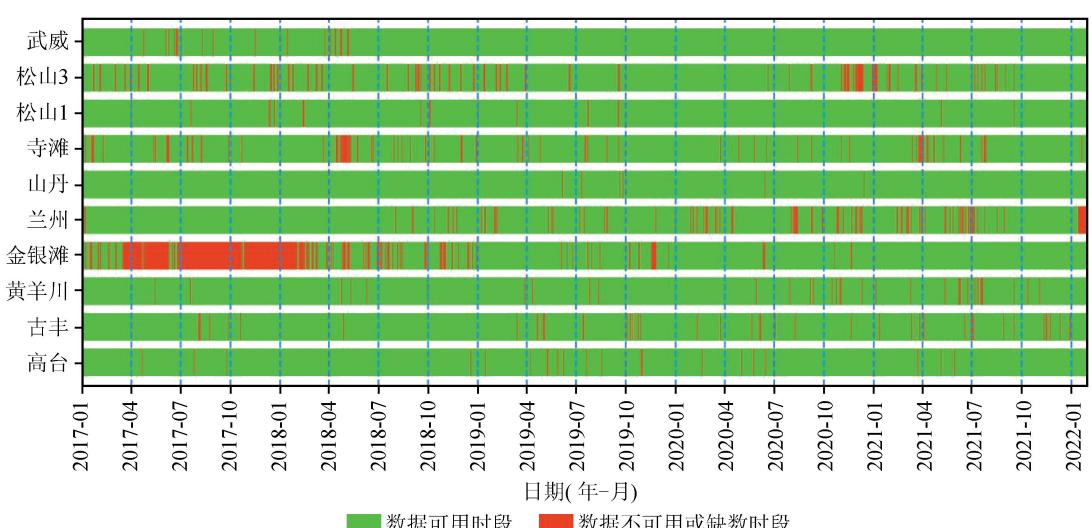


图 2 地电场站数据可用性统计(2017-01-01—2022-01-31)

Fig.2 Data availability statistics of geoelectric field stations (2017-01-01—2022-01-31)

缺数统计。总体上,金银滩站因观测环境复杂在2019年之前数据连续率较低,其他各站有零星时段数据不可用或缺数,但基本上不影响应用其数据进行长时间段、趋势性变化分析。需说明,兰州站自2022年1月14日(门源 $M_s 6.9$ 地震之后)停测,但不影响地震前的数据分析。

1.2 地电场优势方位角分析

岩石物理学和岩石破裂实验表明,加压初期的岩石裂隙小而无序,压力增大会使裂隙发育并呈现有序排列,破裂时有明显的剪裂、黏滑现象^[20]。地壳中岩体内总存在含水裂隙,基于大地电场的岩体裂隙水(电荷)渗流(移动)模型,这些裂隙水或水中电荷在以日为周期沿裂隙往返渗流或移动,因此,岩体裂隙结构的优势方位基本就是地电场的优势方位。在观测台站 NS、NW 测向地电场数据相关性高时,地电场优势方位角(即裂隙优势方位角, α 代表北偏东角度,若为负表示北偏

西)计算公式如下^[5]:

$$\alpha \approx 180^\circ - \left(\frac{180^\circ}{\pi} \right) * \arctan \left[\sqrt{2} \frac{\sum_{i=1}^{10} A_{(\text{NW})i}}{\sum_{i=1}^{10} A_{(\text{NS})i}} - 1 \right] \quad (1)$$

式中: A_i 是第 i 阶潮汐谐波振幅,计算中应用周期分别为 24 h、12 h、8 h、6 h、4.8 h、4 h、3.4 h、3 h、2.7 h、2.4 h 的前 10 阶谐波振幅和。需指出,当装置系统变更或应用其他测向进行组合计算时,式(1)需做相应调整。

基于青海门源 $M_s 6.9$ 地震震中周围 300 km 范围内 9 个地电场站 2017 年 1 月 1 日到 2022 年 1 月 31 日的观测数据(兰州站数据截止 2022 年 1 月 13 日,1 月 14 日停测),根据式(1),分别计算了各观测站地电场优势方位角。图 3(a)中黄羊川站方位角在 2020 年 11 月—2021 年 6 月沿近 45° 的两个方向跳变,之后变化范围缩小并持续到此次地震发生。

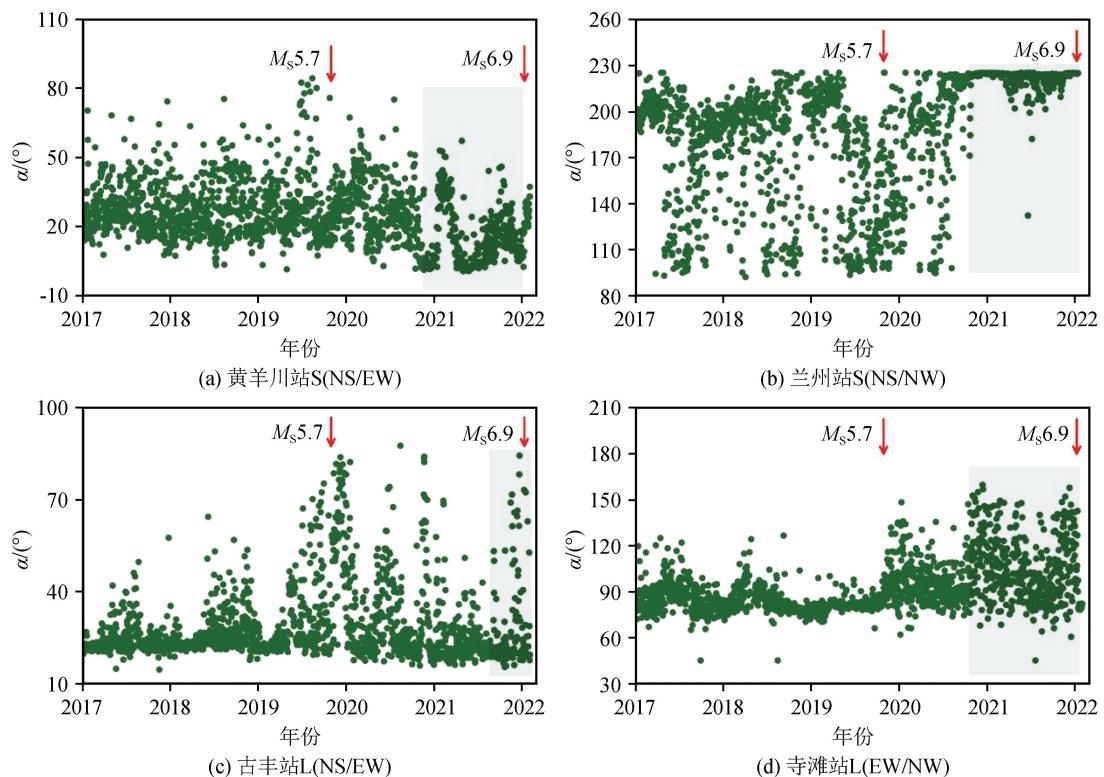


图 3 青海门源 $M_s 6.9$ 地震震中 300 km 范围地电场台优势方位角(2017-01-01—2022-01-31)
(图中 L、S 分别代表长、短极距,如 L(NS/EW) 表示应用 NS 和 EW 测向长极距数据,
S(NS/EW) 表示应用 NS 和 EW 测向短极距数据)

Fig.3 Dominant azimuth angle of geoelectric field within 300 km from the epicenter of
Menyuan $M_s 6.9$ earthquake in Qinghai (2017-01-01—2022-01-31)

图 3(b)中兰州站 2020 年 11 月开始方位角变化范围大幅缩小、挤压成近直线,同时段寺滩站方位角变

化范围扩大至 90° 左右,两站持续这种现象至门源 $M_s 6.9$ 地震发生。黄羊川、兰州和寺滩站地电场优

势方位角异常变化在时间上具有准同步性。古丰站在 2019 年 5—12 月方位角大范围突跳, 与当年 10 月 28 日夏河县发生 $M_{\text{S}}5.7$ 地震对应较好, 2021 年 8 月底开始方位角再次大范围突跳并持续到门源 $M_{\text{S}}6.9$ 地震发生[图 3(c)]。

需要说明的是, 2019 年 10 月 28 日甘肃甘南州夏河县($35.1^{\circ}\text{N}, 102.69^{\circ}\text{E}$)发生 $M_{\text{S}}5.7$ 地震, 震源深度 10 km, 上述黄羊川、兰州、寺滩、古丰等 4 站距离震中均在 300 km 范围内。从图 3 可看出兰州、古

丰等站方位角异常现象也较为明显。

通常, 震中附近孕震过程的应力在不断变化, 理论上岩体裂隙结构会因应力变化而变化。在实际场地, 岩体结构差异会使其裂隙结构对应力变化的响应出现差异, 这导致了不同场地的优势方位角异常具有场地选择性现象^[5]。表 1 对震中周围 300 km 范围内地电场站方位角异常变化情况进行了统计。上述 4 个地电场站优势方位角在震前出现了持续时间 6 个月以上的异常变化, 其中黄羊川、兰州、寺滩

表 1 青海门源 $M_{\text{S}}6.9$ 地震震中 300 km 范围内地电场站方位角 α 异常信息统计

Table 1 Statistics of geoelectric field azimuth α within 300 km of the epicenter of Menyuan $M_{\text{S}}6.9$ earthquake in Qinghai

观测站	震中距/km	α 异常时段	α 异常形态
金银滩	91	无	无
武威	110	无	无
山丹	113	无	无
古丰	144	2021-08—2022-01	变化范围扩大
黄羊川	165	2020-11—2022-01	45°跳变、变化范围缩小
松山(测点 1)	210	无	无
松山(测点 3)	210	无	无
高台	225	无	无
寺滩	239	2020-11—2022-01	变化范围扩大
兰州	276	2020-11—2022-01	变化范围缩小

3 个站方位角变化具有准同步性。山丹、金银滩、武威、高台以及松山站两个测点方位角看不出明显的与此次地震关联的异常变化。

1.3 地电场加卸载响应比分析

在进行地震预测实践中, 理论上任何能够反映孕震区介质损伤、失稳过程的地球物理量均可以作为响应量。传统的加卸载响应比(LURR)计算方法主要通过小震释放的 Benioff 应变进行计算。利用地电场观测资料进行 LURR 计算具有连续性好、计算结果波动范围小等优点。计算地电场加卸载响应比时, 应用地电场的总场资料为响应量, 保留周期为 8~24 h 的固体潮频段, 由于地电场观测资料为矢量观测, 取一段时间内的观测资料绝对值的平均值作为响应量, 定义加卸载响应比为^[18]:

$$Y_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N_+} |E_i| \right)}{\left(\frac{(N_+)}{\sum_{i=1}^{N_-} |E_i|} \right)} \quad (2)$$

式中: N_+ 、 N_- 分别代表处于加载和卸载状态的地电场观测总数, “+”、“-”分别表示加载和卸载; E_i 为第 i 个地电场观测值。

近 5 年(2017-01-01—2022-01-31, 兰州站数据截止 2022-01-13)的时均值观测量, 首先对各测向原始数据资料进行了预处理, 删除单点突跳等明显错误数据, 保证数据的连续性、可靠性、稳定性等, 之后利用 Butterworth 滤波器保留 8~24 h 的潮汐频段信息, 通过库仑应力触发模型的加卸载响应比方法计算 LURR 值。计算时间窗长为 30 天, 滑动步长为 30 天, 计算库仑破裂应力采用的内摩擦系数为 0.4^[18, 21-22], 构造参数采用 USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000g9zq/moment-tensor>) 的青海门源 $M_{\text{S}}6.9$ 地震震源机制解结果, 走向、倾角、滑动角分别为 104° 、 88° 、 15° 。

计算结果表明, 9 个地电场站中古丰、兰州、寺滩和黄羊川 LURR 在震前表现出明显异常变化, 其他站异常变化不明显。图 4 绘制了各异常站具有代表性测向时均值波形(兰州站为短极距数据, 其他各站为长极距数据)及 LURR 值时序图。从图 4 地电场小时值波形中可看出, 除古丰站外, 兰州、寺滩和黄羊川站均显示出较为清晰的年变形态。地电场观测易受周围电磁环境干扰, 这些或多或少都会对日常观测有影响, 但对以年为单位的长时间段数据影响有限, 基本不会改变其变化趋势或形态, 如图 4(b)、(d) 中的兰州、黄羊川站周围电磁环境复杂, 存在明显的干扰数据, 但年变形态仍然可见。

基于震中 300 km 范围内古丰等 9 个地电场站

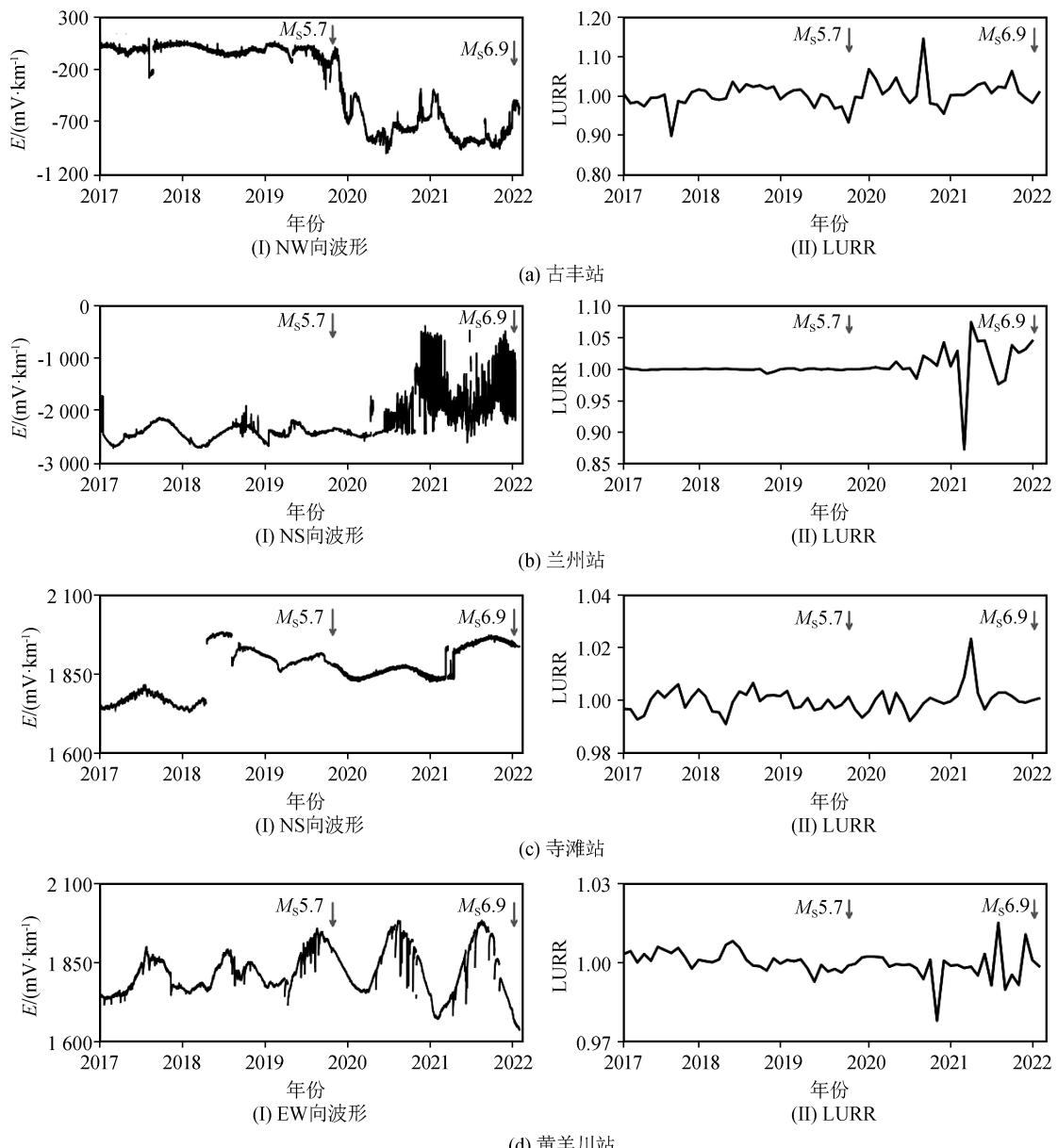


图 4 地电场小时值波形及其 LURR 时序曲线(2017-01-01—2022-01-31)(构造参数:走向、倾角、滑动角分别为 104° 、 88° 、 15°)

Fig.4 Hourly value waveform of geoelectric field and the LURR time series curves (2017-01-01—2022-01-31)

从图 4 的 LURR 时序曲线可以看出,中古丰站

LURR 值从 2019 年 10 月开始出现波动,2020 年 9 月达到最大值 1.14;兰州站该值在 2020 年 8 月开始出现波动,2021 年 4 月出现最大值 1.07;寺滩站该值 2020 年 8 月开始逐渐增大,2021 年 4 月达到最大值 1.02,其变化与兰州站在时间上具有准同步性;黄羊川站 2021 年 6 月开始 LURR 值增大,2021 年 8 月达到最大值 1.02。此外,从图 4 中也可看出,2019 年 10 月 28 日甘肃甘南州夏河县 $M_S 5.7$ 地震前 LURR 值变化不明显,这可能和震级、构造参数

等有关。

Yin 等^[23]指出当远离地震发生的临界状态时,LURR 值在 1 附近波动,在接近地震发生前 LURR 会出现明显高值并持续数月至数年。表 2 对各站 LURR 异常信息进行了统计,可看出各站 LURR 背景值均保持在 1 附近,且波动范围很小。LURR 值异常持续时间在 2~12 个月,地震发生在最大值出现后恢复正常阶段,这与以往的研究结果较为吻合^[24-25]。受台站分布、所处地质构造、震中距等影响,异常开始时间、结束时间、变化幅度等存在差异。

表 2 地电场观测站 LURR 异常信息统计

Table 2 Statistics of LURR anomaly information of geoelectric field observation stations

观测站	震中距/km	LURR 背景值	LURR 最大值	变化幅度/%	LURR 异常时段
古丰	144	1.00	1.14	14	2019-10—2020-09
黄羊川	165	1.00	1.02	2	2021-06—2021-08
寺滩	239	1.00	1.02	2	2020-08—2021-04
兰州	276	1.00	1.07	7	2020-08—2021-04

注:LURR 背景值为正常时段的平均值,结果保留两位小数。

需说明,确定为 LURR 异常站中各站长、短极距 6 个测向至少有 3 个测向出现了异常变化,但异常开始、结束的时间以及幅度存在差异。5 个无异常站中,最多只有一个测向出现了异常,无法判断其可靠性,故文中暂没有归为异常站。因此,有必要对地电场 LURR 异常现象进行更多的深入研究。

2 讨论

2.1 数据处理方法可信度分析

众所周知,地电场观测数据易受场地周围电磁环境影响。文中在应用地电场数据时未特意说明所受干扰情况,一方面优势方位角和 LURR 计算方法均从潮汐频段提取异常信息,因其计算方法及取值特点,理论上受干扰影响可能小。其实,模拟分析表明常规的直流供电、突跳、脉冲、地铁等典型干扰对方位角计算结果影响有限^[26]。另一方面数据应用长度达 1 800 多天,且分析的是趋势变化,一般的短期干扰基本不会改变其变化趋势,且在数据变异的可信度分析中,采用同区域多场地准同步性判断原则^[27]。因此,个别台站尽管电磁环境复杂,如兰州、黄羊川等站存在地铁、游散电流等影响,但选择适当的数据处理方法,其震前异常信息也可能会表现出来。

2.2 地电场优势方位角与区域主压应力 P 走向

图 5 展示了黄羊川等 4 站地电场优势方位角与区域主压应力 P 走向的位置关系,其中 P 走向为 237°(来自 USGS 的青海门源 $M_s 6.9$ 地震震源机制解结果)。

图 5(a) 黄羊川站方位角在 2020 年 10 月到 2021 年 6 月在 0°~45° 范围有序跳变,可能反映了期间场地岩体剪裂现象,之后变化范围逐渐稳定,与 P 走向夹角接近 45°(小于 45°)。兰州站方位角变化范围在 2020 年 11 月开始大幅度缩小,向主压应力 P 走向靠近(夹角 10°左右),期间出现小幅突跳,临震前 1 个月突跳消失[图 5(b)]。寺滩站方位角变化范围在 2020 年 11 月开始变大,并持续到地震发生,其变化最大范围值与主压应力 P 走向近 90°夹

角[图 5(c)]。古丰站方位角与主压应力 P 走向夹角在 0°~37°范围内,2021 年 3—10 月方位角向与 P 走向夹角增大的方向集中[图 5(d)]。

总体上,黄羊川、兰州、寺滩、古丰站异常期间其方位角与区域主压应力 P 走向分别接近 45°、10°、90°、34° 夹角,这基本符合岩石物理学中剪切破裂与主压应力夹角接近但小于 45°,岩体发生共轭剪裂时与主压应力接近正交等理论^[20]。这从另一方面也增强了地电场优势方位角方法在分析地震前兆异常中的可信度。

需说明,文中 1.2 节计算各站方位角起始时间为 2017 年 1 月 1 日—2022 年 1 月 10 日,本节中主要分析方位角异常时与区域主压应力 P 走向的方位关联,因此方位角起始时间选为 2019 年 1 月 1 日—2022 年 1 月 31 日(兰州站数据截止 2022 年 1 月 13 日)。事实上,通过上文分析各站在 2019 年前也没有出现与此次地震可能关联的方位角异常现象。

2.3 地电场优势方位角与 LURR 值

近年来,谭大诚等^[3-5]的研究表明,地电场波形的异常变化一方面与岩石所受应力的突变有关,另一方面可能反映岩石微破裂加剧导致地下水向破裂区渗流的现象。孕震过程中,应力不断加卸载,当孕震区岩石介质处于弹性阶段,岩石对加载时和卸载时响应率是一致的,此阶段岩体没有产生新的裂隙,岩体内的流体运移状态没有发生明显变化,由地电场计算的 LURR 值、优势方位角也应该没有明显变化。随着应力不断积累,岩石逐渐进入屈服阶段,此时岩石在加载时的响应率大于卸载时的响应率,LURR 出现高值异常,此时在应力的加卸载影响下岩体开始出现新裂隙,导致流体运移状态发生变化^[5,18],因此反映岩体裂隙结构、流体渗流变化的地电场优势方位角也应该出现异常变化。

门源 $M_s 6.9$ 地震震中 300 km 范围内古丰、黄羊川、寺滩、兰州等地电场站优势方位角与 LURR 值在震前均出现了异常变化,综合分析区域岩体状态发生变化的可能性较大。表 3 对两者的异常时段进行了统计。其中古丰站 LURR 异常开始较早,持

续时间为12个月,方位角异常出现在LURR异常结束后。兰州和寺滩站方位角、LURR异常变化均具有同步性,且LURR异常开始时间、结束时间都在前。黄羊川站方位角异常开始时间在LURR异常前,结束时间在其后。岩体裂隙在岩体屈服阶段

产生较多^[28],理论上方位角异常开始时间应在LURR出现异常之后,上述4个地电场站中3个符合这一推测。在实际场地,岩体结构差异会使裂隙结构对应力变化的响应出现差异,因此黄羊川站LURR异常出现在方位角异常之后也存在可能性。

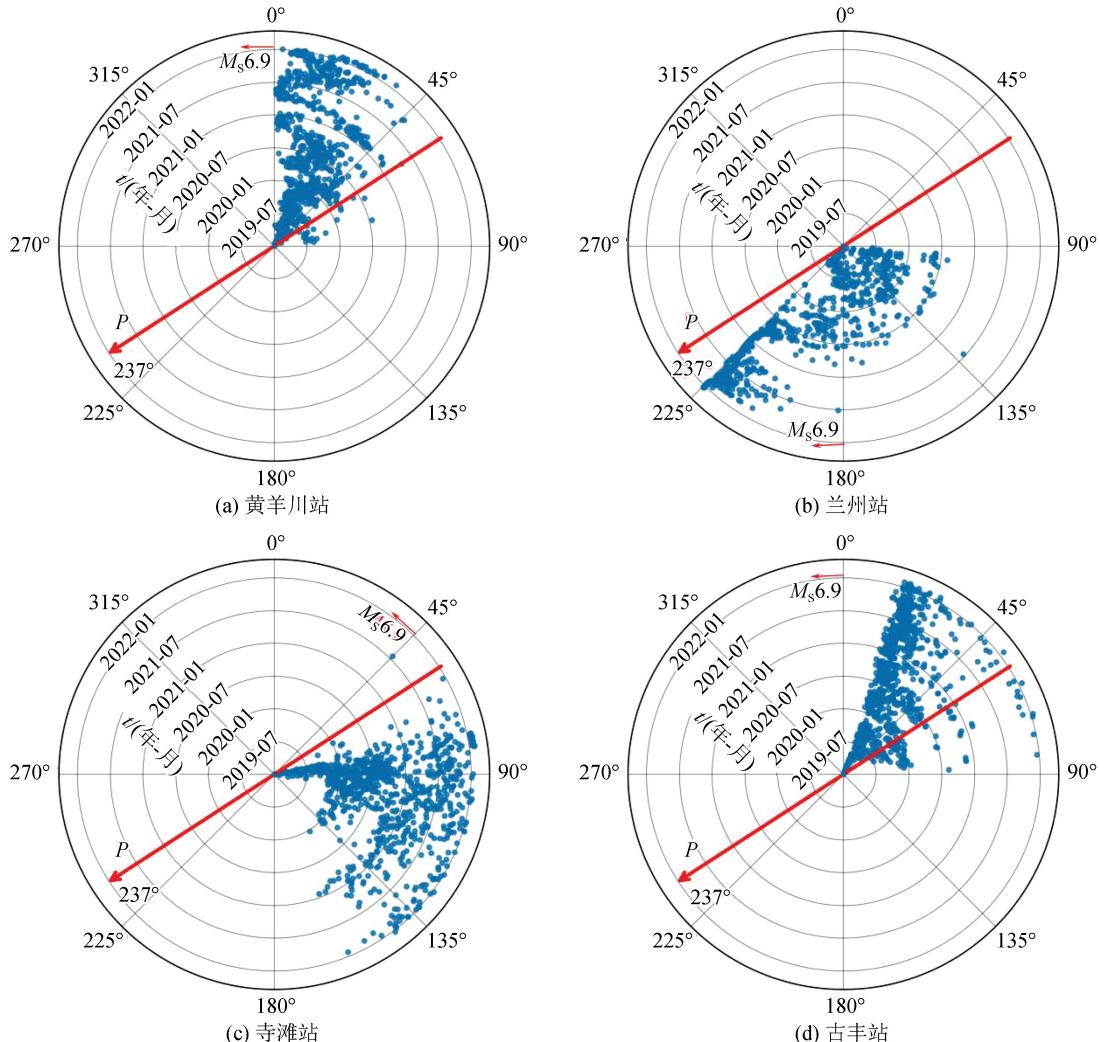


图5 青海门源 $M_{S6.9}$ 地震区域主压应力 P 走向与地电场优势方位角(2019-01-01—2022-01-31)

Fig.5 Direction of principal compressive stress P axis and dominant azimuth of geoelectric field in the area of Menyuan $M_{S6.9}$ earthquake in Qinghai (2019-01-01—2022-01-31)

表3 地电场优势方位角与LURR值异常时段统计

Table 3 Statistics of abnormal period of geoelectric field dominant azimuth and LURR value

观测站	LURR 异常时段	方位角异常时段
古丰	2019-10—2020-09	2021-08—2022-01
黄羊川	2021-06—2021-08	2020-11—2022-01
寺滩	2020-08—2021-04	2020-11—2022-01
兰州	2020-08—2021-04	2020-11—2022-01

3 结论

基于青海门源 $M_{S6.9}$ 地震震中 300 km 范围内

地电场近5年观测资料,根据大地电场岩体裂隙水(电荷)渗流(移动)模型计算了其优势方位角,并尝试通过库仑应力触发模型的加卸载响应比计算方法计算了地电场 LURR 值,结合区域主压应力 P 走向,对地电场优势方位角和 LURR 异常现象进行了初步分析和讨论,得出以下几点认知:

(1) 两种不同方法计算的地电场异常站在空间分布上具有一致性。具体来说,古丰、黄羊川、寺滩和兰州站地电场优势方位角、LURR 皆出现了异常变化,而山丹、金银滩、武威、高台以及松山站两个测

点方位角、LURR 均看不出明显的异常变化。

(2) 兰州和寺滩站两种计算方法的结果时序变化较为吻合,表现出准同步性。此外,黄羊川方位角变化与兰州、寺滩站也具有准同步性。

文中地电场异常站其优势方位与区域主压应力 P 走向的关联基本符合岩石物理学理论,结合震源机制解结果分析地电场优势方位角变化,在一定程度上可增强地电场优势方位角方法在分析地震前兆异常中的可信度。总体上青海门源 $M_s 6.9$ 地震前地电场优势方位角以及以地电场为响应量的 LURR 值异常变化较为明显,这两种方法在机理上具有关联性,综合分析其异常演化特征可能有助于进一步认知地震孕育的物理过程。然而,在这方面还需要开展更多、更深入的研究。

致谢:地电场数据来源于青海、甘肃等省地震局,作者感谢工作人员的辛勤付出。

参考文献(References)

- [1] 孙正江,王华俊.地电概论[M].北京:地震出版社,1984:23-28.
SUN Zhengjiang, WANG Huajun. Introduction on the geoelectric subject[M]. Beijing: Seismological Press, 1984:23-28.
- [2] 黄清华,刘涛.新岛台地电场的潮汐响应与地震[J].地球物理学报,2006,49(6):1745-1754.
HUANG Qinghua, LIU Tao. Earthquakes and tide response of geoelectric potential field at the Niijima station[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1745-1754.
- [3] 谭大诚,赵家骝,席继楼,等.潮汐地电场特征及机理研究[J].地球物理学报,2010,53(3):544-555.
TAN Dacheng, ZHAO Jialiu, XI Jilou, et al. A study on feature and mechanism of the tidal geoelectrical field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 544-555.
- [4] 谭大诚,王兰炜,赵家骝,等.潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素[J].地球物理学报,2011,54(7):1842-1853.
TAN Dacheng, WANG Lanwei, ZHAO Jialiu, et al. Influence factors of harmonic waves and directional waveforms of tidal geoelectrical field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (7): 1842-1853.
- [5] 谭大诚,辛建村,王建军,等.大地电场岩体裂隙模型的应用基础与震例解析[J].地球物理学报,2019,62(2):558-571.
TAN Dacheng, XIN Jiancun, WANG Jianjun, et al. Application foundation and earthquake case analysis of the telluric field rock crack model[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(2): 558-571.
- [6] 王玮铭,谭大诚.2019 年长宁 $M_s 6.0$ 地震邻区分钟采样地电场分析[J].地震,2020,40(3):41-51.
WANG Weiming, TAN Dacheng. Analysis of anomalies in geoelectric field around 2019 Changning $M_s 6.0$ earthquake[J]. Earthquake, 2020, 40(3): 41-51.
- [7] 王宇,谭大诚,邱大琼,等.2020 年新疆于田 $M_s 6.4$ 地震和田台地电场异常的测道差异性[J].地震,2021,41(2):180-189.
WANG Yu, TAN Dacheng, QIU Daqiong, et al. The azimuth difference of the geoelectric field anomaly of Hetian station in the 2020 Yutian $M_s 6.4$ earthquake, Xinjiang[J]. Earthquake, 2021, 41(2): 180-189.
- [8] 艾萨·伊斯马伊力,冯志生,陈界宏,等.2020 年新疆于田 $M_s 6.4$ 地震前地磁谐波振幅比变化特征分析[J].地震,2021 (2):190-202.
AISA Yisimayili, FENG Zhisheng, CHEN Jiehong, et al. Anomalies of the geomagnetic harmonic wave amplitude ratio before the 2020 Yutian $M_s 6.4$ earthquake, Xinjiang[J]. Earthquake, 2021(2):190-202.
- [9] 侯泽宇,安张辉,范莹莹,等.云南漾濞县 6.4 级地震前地电场异常回溯性分析[J].地震工程学报,2021,43(4):807-817.
HOU Zeyu, AN Zhanghui, FAN Yingying, et al. Retrospective analysis of geoelectric field anomalies before the Yangbi $M_s 6.4$ earthquake in Yunnan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 807-817.
- [10] 辛建村,张晨蕾.漾濞县 $M_s 6.4$ 、玛多县 $M_s 7.4$ 地震前地电场变化分析[J].地震工程学报,2021,43(4):818-825.
XIN Jiancun, ZHANG Chenlei. Geoelectric field changes before the Yangbi $M_s 6.4$ and Maduo $M_s 7.4$ earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 818-825.
- [11] 张志宏,李梦莹,焦明若,等.基于大地电场岩体裂隙水渗流模型的地震前兆异常特征研究[J].大地测量与地球动力学,2021,41(9):979-984.
ZHANG Zihong, LI Mengying, JIAO Mingruo, et al. Study of the characteristics on earthquake precursor anomalies: based on the telluric field rock crack water seepage model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(9): 979-984.
- [12] 戴苗,冯志生,刘坚,等.2020-07 唐山 $M_5.1$ 地震前电磁资料综合分析[J].大地测量与地球动力学,2021,41(11):1146-1151.
DAI Miao, FENG Zhisheng, LIU Jian, et al. Comprehensive analysis of electromagnetic data before Tangshan $M_5.1$ earthquake in July 2020[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(11): 1146-1151.
- [13] 尹祥础.地震预测新途径的探索[J].中国地震,1987,3(1):3-10.
YIN Xiangchu. The new approach of earthquake prediction[J]. Earthquake Research in China, 1987, 3(1): 3-10.
- [14] 尹祥础,陈学忠,宋治平,等.加卸载响应比:一种新的地震预报方法[J].地球物理学报,1994(6):767-775.
YIN Xiangchu, CHEN Xuezhong, SONG Zhiping, et al. The load-unload response ratio theory: a new approach to earthquake prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994(6): 767-775.
- [15] YIN X C, CHEN X Z, SONG Z P, et al. A new approach to earthquake prediction: the load/unload response ratio (LURR) theory[J]. Pure and Applied Geophysics, 1995, 145 (3-4): 701-715.
- [16] 安张辉,杜学彬,谭大诚,等.四川芦山 $M_s 7.0$ 和汶川 $M_s 8.0$

- 地震前地电场变化研究[J].地球物理学报,2013,56(11):3868-3876.
- AN Zhanghui,DU Xuebin,TAN Dacheng,et al.Study on the geo-electric field variation of Sichuan Lushan $M_S 7.0$ and Wenchuan $M_S 8.0$ earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(11):3868-3876.
- [17] 席继楼,陈敏,董蕾,等.长宁 $M_S 6.0$ 地震前后地电场秒数据变化特征研究[J].地震,2020,40(4):129-143.
- XI Jilou,CHEN Min,DONG Lei,et al.Study on the second data variation characteristics of geoelectric field before and after Changning $M_S 6.0$ earthquake[J].Earthquake,2020,40(4):129-143.
- [18] 于晨,王淑艳,苑争一,等.2020年6月26日于田 $M_S 6.4$ 地震前 Benioff 应变和地电场加卸载响应比异常研究[J].中国地震,2020,36(3):417-426.
- YU Chen,WANG Shuyan,YUAN Zhengyi,et al.LURR to benioff strain and geoelectric field before Yutian $M_S 6.4$ earthquake of June 26, 2020[J].Earthquake Research in China,2020,36(3):417-426.
- [19] 李霞,赵玉红,冯丽丽,等.2021年青海玛多 $M_S 7.4$ 地震前都兰地电场异常特征[J].地震研究,2021(4):642-649.
- LI Xia,ZHAO Yuhong,FENG Lili,et al.The variation of geo-electric field at the Dulan seismic station before the 2021 maduo,Qinghai $M_S 7.4$ earthquake[J].Journal of Seismological Research,2021(4):642-649.
- [20] 陈颙,黄庭芳,刘恩儒.岩石物理学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009:6-131.
- [21] YU H Z,CHENG J,ZHANG X T,et al.Multi-methods combined analysis of future earthquake potential[J].Pure and Applied Geophysics,2013,170(1-2):173-183.
- [22] YU H Z,ZHOU F R,ZHU Q Y,et al.Development of a combination approach for seismic hazard evaluation[J].Pure and Applied Geophysics,2016,173(1):221-233.
- [23] YIN X C,WANG Y C,PENG K Y,et al.Development of a new approach to earthquake prediction:load/unload response ratio (LURR) theory[J].Pure and Applied Geophysics,2000,157(11-12):2365-2383.
- [24] 尹祥础,刘月,张浪平,等.“泛西南”地区加卸载响应比异常及大震活动预测与追踪[J].地震,2017,37(4):37-49.
- YIN Xiangchu, LIU Yue, ZHANG Langping, et al. LURR anomaly, prediction and tracking of large earthquakes in the pan-southwestern region[J].Earthquake,2017,37(4):37-49.
- [25] 岳冲,牛安福,余怀忠,等.九寨沟 $M_S 7.0$ 地震前地应变 LURR 异常演化特征[J].中国地震,2020,36(2):267-275.
- YUE Chong, NIU Anfu, YU Huaizhong, et al. Evolutionary characteristics of ground strain LURR anomaly before Jiuzhaigou $M_S 7.0$ earthquake[J].Earthquake Research in China,2020,36(2):267-275.
- [26] 辛建村,谭大诚,赵菲,等.典型干扰对岩体裂隙优势方位计算结果的影响研究[J].地震,2017,37(4):112-122.
- XIN Jiancun,TAN Dacheng,ZHAO Fei,et al.Calculation of preferred orientation of rock cracks influenced by typical interferences[J].Earthquake,2017,37(2):112-122 (in Chinese).
- [27] TAN Dacheng,XIN Jiancun.Correlation between abnormal trends in the spontaneous fields of tectonic plates and strong seismicities[J].Earthquake Science,2017,30(4):173-181.
- [28] LI C,NORDLUND E.Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J].Rock Mechanics and Rock Engineering,1993,26(4):333-351.

(上接第 407 页)

- [33] 代炜,严武建,马占虎.2008年3月30日甘肃肃南5.0级地震特征[J].西北地震学报,2010,32(3):307-312.
- DAI Wei,YAN Wujian,MA Zhanhu.Principal features of Sunnan $M_S 5.0$ earthquake on 30 March 2008 in Gansu Province [J].Northwestern Seismological Journal,2010,32(3):307-312.
- [34] 杨萍,张辉,冯建刚.2015年11月23日青海祁连 $M_S 5.2$ 地震震源机制解及发震构造初步探讨[J].地震工程学报,2017,39(1):150-153,185.
- YANG Ping,ZHANG Hui,FENG Jiangang.Preliminary study on focal mechanism solution and seismogenic structure of Qilian, Qinghai $M_S 5.2$ earthquake on Nov. 23, 2015[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(1):150-153,185.
- [35] 蒋海昆.中国震例(2013)[M].北京:地震出版社,2019.

- JIANG Haikun.Earthquake cases in China (2013)[M].Beijing:Seismological Press,2019.
- [36] 姜文亮,李永生,田云锋,等.冷龙岭地区2016年青海门源6.4级地震发震构造特征[J].地震地质,2017,39(3):536-549.
- JIANG Wenliang, LI Yongsheng, TIAN Yunfeng, et al. Research of seismogenic structure of the Menyuan $M_S 6.4$ earthquake on January 21, 2016 in Lenglongling area of NE Tibetan Plateau[J].Seismology and Geology,2017,39(3):536-549.
- [37] 聂晓红,李莹甄.2008年3月21日新疆于田7.4级地震序列特征及震前部分地震学异常特征[J].内陆地震,2010,24(4):330-339.
- NIE Xiaohong, LI Yingzhen.Seismic sequence and seismology anomalous characteristics before the earthquake of Yutian $M_S 7.4$ earthquake on Mar. 21, 2008, Xinjiang[J].Inland Earthquake,2010,24(4):330-339.