

苏鹤军,曹玲玲,范兵,等.甘东南地球物理场异常与夏河 $M_s5.7$ 地震关系分析[J].地震工程学报,2021,43(6):1269-1279.
DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1269
SU Hejun, CAO Lingling, FAN Bing, et al. Relationship between geophysical anomalies in the southeastern Gansu and the Xiahe $M_s5.7$ earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(6): 1269-1279. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1269

甘东南地球物理场异常与夏河 $M_s5.7$ 地震关系分析

苏鹤军^{1,2,3}, 曹玲玲³, 范 兵³, 李晨桦^{1,2,3}, 周慧玲^{1,2,3}, 马东正^{1,2,3}

(1. 甘肃兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局兰州岩土地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000)

摘要: 基于甘东南地区 2019 年地球物理场年度异常, 对该区域的地球物理定点观测资料进行全时空扫描, 9 个台站 18 个台项在夏河 $M_s5.7$ 地震前出现异常变化。从异常的重复性、多学科前兆的协调性、异常的时空演化及震后异常变化 4 个方面对各个异常进行信度划分, 并根据划分结果定量计算了各个异常与夏河地震关系的信度值。结果显示: 18 项异常的信度都在 50% 以上, 表明作为夏河地震的前兆异常基本可信, 但异常信度存在差异, 其中临夏水位、临夏钻孔应变 NS 向和武都两水水位的信度最高, 达到 80%, 临夏水温和水钻钻孔应变 NS、NW 向的信度最低, 低于 60%。空间分布上, 分布在光盖山—迭山断裂的异常信度较高, 而位于西秦岭北缘断裂北侧的异常信度较低, 这与该地区构造应力的集中和孕震机制有关。地球物理异常信度分析对建立有效的地震预报指标体系具有很好的促进意义。

关键词: 夏河 $M_s5.7$ 地震; 甘东南; 地球物理场; 异常; 协调性; 信度

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)06-1269-11

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.06.1269

Relationship between geophysical anomalies in the southeastern Gansu and the Xiahe $M_s5.7$ earthquake

SU Hejun^{1,2,3}, CAO Lingling³, FAN Bing³, LI Chenhua^{1,2,3}, ZHOU Huiling^{1,2,3}, MA Dongzheng^{1,2,3}

(1. Gansu Lanzhou Geophysics National Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China;

2. Lanzhou Institute of Geotechnique and Earthquake, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Combined with the annual geophysical anomalies in 2019, the geophysical fixed-point observation data in the southeastern region of Gansu Province were processed by temporal and spacial scanning, and it was found that eighteen items in nine monitoring stations experienced abnormal changes before the Xiahe $M_s5.7$ earthquake. The reliability of these anomalies were divided from four aspects: the repeatability of anomaly, the coordination of multidisciplinary precursors, the temporal and spatial evolution of anomaly, and the change of anomaly after the earthquake. The reliability value of each anomaly related to the Xiahe earthquake was calculated according to the division results. The calculated results showed that the reliability of each anomaly

收稿日期: 2020-05-25

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH21033); 甘肃省地震局地震科技野外站基金(2021Y11)

第一作者简介: 苏鹤军(1973—), 男, 甘肃通渭人, 副研究员, 主要研究方向为构造地球化学。E-mail: 250355657@qq.com。

通信作者: 曹玲玲(1972—), 副研究员, 主要从事地下流体预测地震方面的研究。E-mail: caolingling@sina.com。

is more than 50%, indicating that they are basically credible as precursory anomalies of the Xiahe earthquake. Among them, the reliability values of Linxia water level, Linxia borehole strain in the NS direction, and Liangshui water level in Wudu are the highest, up to 80%; the reliability values of Linxia water temperature and Tianshui borehole strain in NS and NW directions are the lowest, less than 60%. The reliability values of anomalies along the Guanggaishan—Dieshan fault are higher than those in the north side of the northern margin fault of the West Qinling, which is related to the concentration of tectonic stress and seismogenic mechanism in the area. The reliability analysis of geophysical anomalies is of great significance to establish an effective earthquake prediction index system.

Keywords: Xiahe $M_s5.7$ earthquake; southeastern Gansu; geophysical field; anomaly; harmony; reliability

0 引言

对震后地球物理场异常特征的研究已有几十年,不论是流体、形变还是地电,都总结出了一系列的异常指标,如流体异常在中短期阶段具有阶段性、加速性及空间分布上的群体性和配套性特征^[1],且在异常发展的不同阶段,远源区与近源区异常的演化存在差异^[2-3]。近震中区地电阻率异常以负向变化为主,异常出现时间具有时空转移特征^[4-5],走滑型地震震中区异常形态成四象限分布^[6];牛安福等^[7]认为震前形变异常的空区是一种重要的前兆分布现象等。在异常信度的研究上,解滔等^[8]和晏锐等^[9]对汶川 $M_s8.0$ 地震的地电和流体异常再次进行分析和认定,认为异常信度的分析对认识地震孕育机理具有重要意义。但此项研究在正式出版的刊物上并不多见,这也可能是确定的前兆异常特征重复性差,建立的指标体系预测地震准确率不高的因素之一。

2019 年 10 月 28 日,甘肃甘南州夏河县发生了 $M_s5.7$ 地震,震源深度 10 km,发震断层为临潭—宕昌断裂,该断裂向南逆冲为主,具左旋走滑分量^[10]。地震最高烈度为 VII 度,面积为 196 km²,VI 度面积为 1 395 km²,震害沿临潭—宕昌断裂分布^[11]。这是继 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震后发生在此断裂的又一次中强地震,且位于 2019 年度全国地震重点危险区内。目前地震的预测水平还很低,地震发生后对异常的回溯性研究对提高地震预测水平显得尤为必要。

夏河 $M_s5.7$ 地震发生在地球物理定点观测台站分布密集、学科齐全的地区,且 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震发生后,对该区域的构造活动和地震孕育机制已有深入的研究^[10,12]。本文拟从异常重现性、多学科前兆协调性、异常的时空演化特征及震后异常变化 4 个方面对夏河地震前出现的异常进行

信度分析,并综合计算出各个异常作为夏河地震异常的信度。该研究对有效跟踪地震,提高地震预测水平具有重要的意义。

1 研究区域的选择及异常提取

1.1 研究区域及资料的选择

夏河 $M_s5.7$ 地震发生在临潭—宕昌断裂上,东昆仑断裂向北扩展过程中发育了 NW 向的迭部—白龙江断裂、光盖山—迭山断裂和临潭—宕昌断裂,逐步过渡到西秦岭北缘断裂,迭部—白龙江断裂和光盖山—迭山断裂构造变形的动力源来自东昆仑断裂的推挤,而临潭—宕昌断裂不仅受到西秦岭北缘断裂的推挤,也受到东昆仑断裂向北推挤的影响^[13-14](图 1)。基于此构造背景,本文选取甘东南地区西秦岭北缘大断裂(包括北侧附近)和东昆仑大断裂的围限区为研究区域,研究该区域内地球物理定点观测资料在夏河地震前的变化。该区域共有地球物理场定点观测台站 16 个,台项 63 个,它们都在距离震中 300 km 范围之内。选取 2017 年已经观测、观测环境良好并仪器运行稳定的 14 个台站 47 个台项,对观测以来的全部数据进行了分析,需要说明的是,这些台站出现的异常变化都进行了现场核实,特别是水位的变化。

1.2 异常提取方法

定点异常的提取方法很多^[16-19],但各种方法都有一定的使用条件,如采样频率、周期性等。本文选取的资料不仅采样频率不同,而且包含了流体、形变和电阻率 3 大测项,因此很难用一种数学处理方法进行异常提取。而原始观测资料具有明确的物理含义,不同测项都记录观测点周围介质的变化,相互间可以比较,均值计算只是对数据的简单平滑,不改变其物理意义,因此本文采用五日均值法进行异常提取。

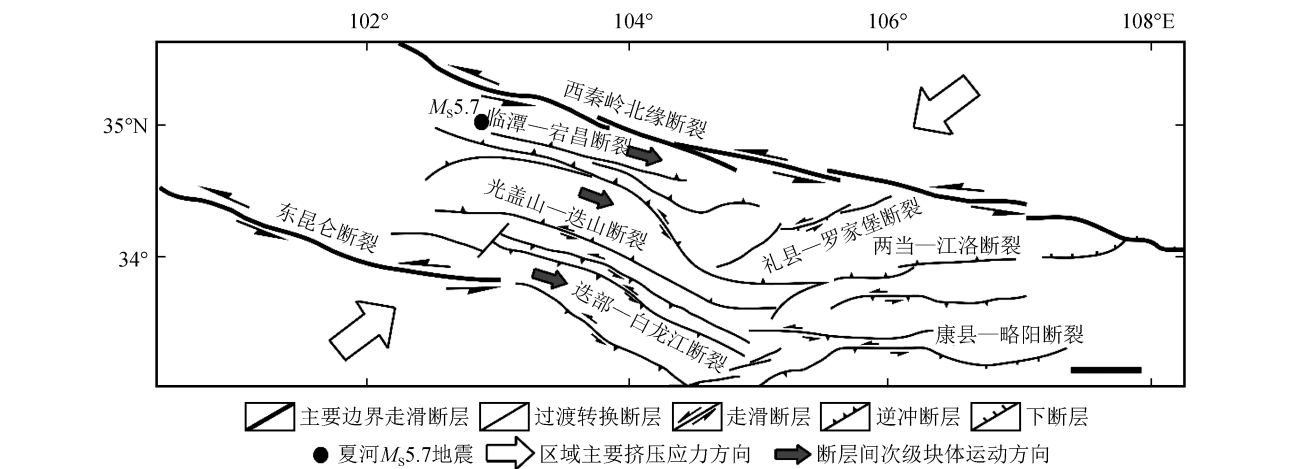


图 1 夏河 $M_s5.7$ 地震地质构造背景^[15]

Fig 1. The Geological structure background of Xiahe $M_s5.7$ earthquake^[15]

1.3 异常提取结果

通过数据分析,共有 9 个台站 18 个台项在夏河地震前出现了异常变化,具体台站及变化数据列于表 1。其中 8 个台项为震前跟踪的年度异常^①,分别为武山 22 号井水氡、临夏水位、两水水位、武都倾斜、两水应变(NS 向、EW 向)和天水应变(NS 向、NW 向)。空间上,异常台站分布在西秦岭北缘断裂两侧和光盖山—迭山断裂东南端(图 2),位于西秦岭北缘断裂的异常台项有临夏水位、水温、钻孔应变,刘家峡钻孔应变、天水北道钻孔应变和武山 22 号井水氡,占该区域总台项数的 27.5%。光盖山—

迭山断裂东南端 5 个台站都出现了异常。测项分布上,流体有 5 个,占流体总台项数的 35%;电阻率有 2 个台站 4 个台项,占电阻率总台项数的 80%;形变异常台项虽然最多,为 6 个台站 9 个台项,但占形变总台项数的比例并不高,为 33%。异常形态以趋势转折和破年变为主,异常开始时间为震前 25 个月到 5 个月。

2 异常与地震关系分析

2.1 异常的重现性

位于同一断层且距离较近的地震,当震级相差

表 1 地球物理定点观测异常特征统计表

Table 1 Anomaly characteristics of geophysical fixed-point observation data

台站	测项	异常出现时间	异常转折时间	异常特征	震中距/km
临夏	水位	2017 年 10 月	2018 年 10 月	高值	79
	水温	2017 年 10 月	-	上升速率减小	
	电阻率 NS 向	2018 年 10 月	-	趋势转折	
	电阻率 EW 向	2018 年 10 月	-	趋势转折	
	钻孔应变 NS 向	2017 年 10 月	2018 年 10 月	低值	
刘家峡	钻孔应变 NS 向	2019 年 3 月	-	上升	67
	钻孔应变 NE 向	2019 年 3 月	-	下降	
武山	水氡	2016 年 8 月	2019 年 3 月	下降-转平	221
天水	钻孔 NS 向	2019 年 5 月	-	破年变高值	299
	钻孔 NW 向	2019 年 5 月	-	破年变高值	
汉王	电阻率 NS 向	2018 年 3 月	2019 年 2 月	破年变高值	287
	电阻率 EW 向	2018 年 3 月	2019 年 2 月	破年变高值	
宕昌	水管倾斜 EW 向	2018 年 8 月	2019 年 5 月	加速东倾-西倾	204
两水	水位	2017 年 9 月	2018 年 8 月	上升-下降	273
	钻孔应变 NS 向	2018 年 10 月	-	上升-转平	
	钻孔应变 EW 向	2017 年 9 月	2019 年 1 月	上升-下降	
樊坝	钻孔倾斜 EW 向	2017 年 9 月	-	持续上升	279
武都	倾斜	2017 年 11 月	2019 年 1 月	上升-转折下降	286

标注:“-”表示没有出现此变化

① 2019 年度甘肃省地震趋势研究报告[R].2019.

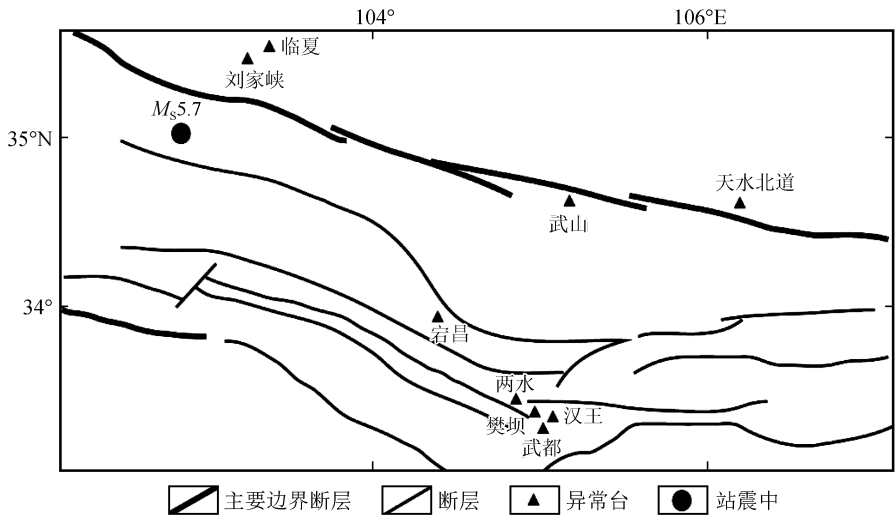


图 2 地球物理定点异常台站空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of geophysical fixed-point stations with anomalies

不大时,在孕育过程中应力场的变化引起的异常应具有相似性特征,因此异常的重现性是判断异常与地震关系的重要指标。2013 年 7 月 22 日,在夏河地震的发震断层上发生了岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震,

两次地震震中相距 160 km,震级相差 0.9。在岷县—漳县地震前已观测且在夏河地震前出现异常的台站有 7 个,除临夏深层水温之外,其他都在岷县—漳县地震前出现了异常(图 3)。

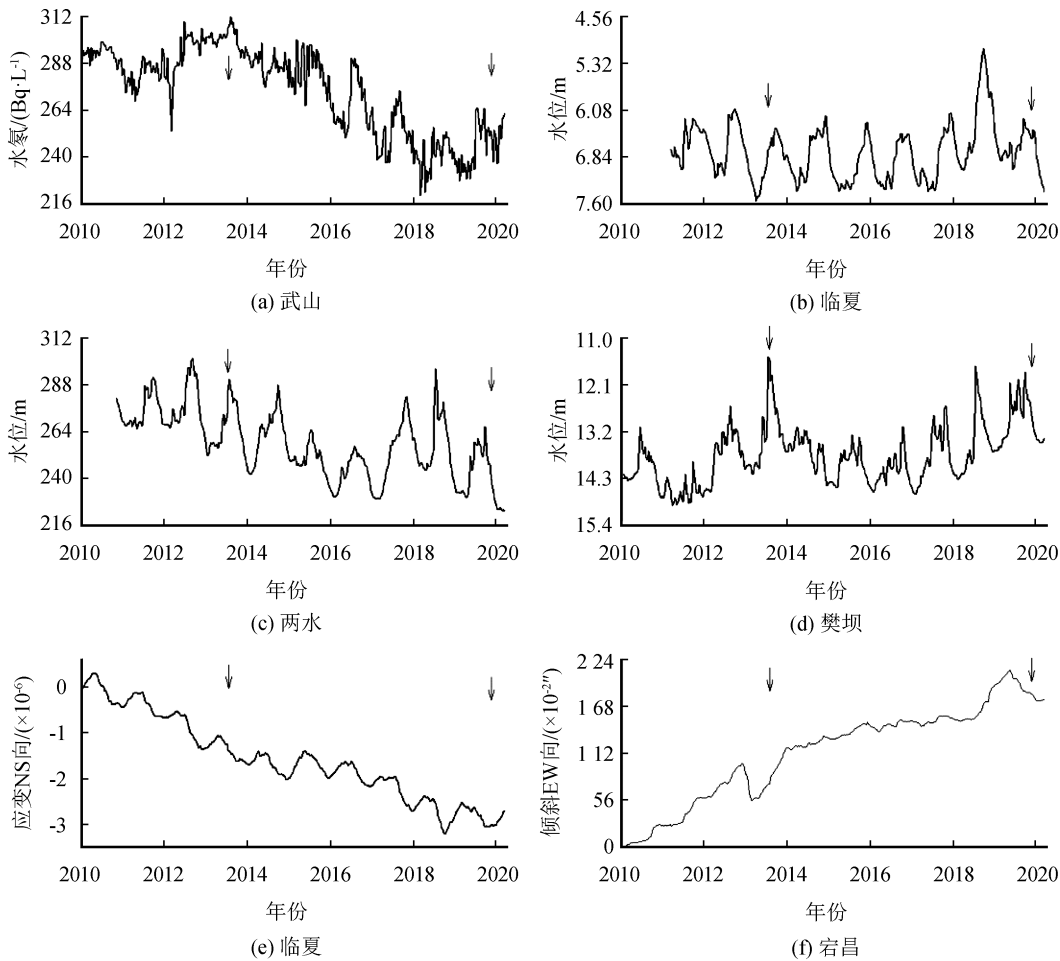


图 3 岷县漳县 $M_s6.6$ 和夏河 $M_s5.7$ 地震前异常曲线

Fig.3 Anomalous curves before Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ and Xiahe $M_s5.7$ earthquakes

两次地震前,临夏水位和两水水位都呈现为上升→下降→发震→恢复变化;樊坝水位都呈现为上升→发震→恢复变化;临夏应变 NS 向都为低值变化,异常期间发震;宕昌倾斜 EW 向异常开始都为加速东倾,转折加速西倾后发生地震;武山 22 号井水氡 2 次地震前异常略有差别,岷县—漳县地震表现为下降→快速上升→转平→地震;而夏河地震前表现为下降→转平→地震,但都出现了下降→转折变化。因此,根据异常重现性特征,临夏水位、两水水位、樊坝水位、临夏应变 NS 分量和宕昌倾斜 EW 分量异常变化作为夏河地震的前兆异常信度最高,其次为武山 22 号井水氡,临夏水温最低。

2.2 多学科异常协调性特征

相同地质环境和构造背景下的地球物理场定点观测,多学科异常演化上具有协调性特征^[15]。本文提取出的异常台站集中分布在两个地区,一个为西秦岭北缘断裂带两侧,一个为光盖山—迭山断裂带东南端(图 2),且都包含流体、形变和地电阻率测项。

2.2.1 西秦岭北缘断裂

位于西秦岭北缘断裂两侧的异常台站有 4 个,分别为临夏台、刘家峡台、武山台和天水北道台,其中临夏台为多学科综合测点。除武山台位于断裂南侧外,其他都位于断裂北侧,临夏台和刘家峡台相距 12.8 km,另外 2 个台相距较远且分散(图 2)。临夏测点的 5 项异常,除电阻率为布极测量外,流体和形变测点相距仅几米。

从表 1 可看出,异常时间协调性变化上,临夏水位、水温和钻孔应变 NS 向异常出现的时间完全同步,都为 2017 年 10 月,并且当水位和应变 2018 年 10 月同步出现转折时,电阻率两个测向出现了异常。刘家峡钻孔应变异常的出现时间与距离最近的临夏测点并不同步,但与武山水氡异常的转折时间同步。天水钻孔应变异常出现在 2019 年 5 月,同期没有异常出现或转折。

异常变化形态上,最早出现异常的临夏测点(由于武山 22 号井水氡异常开始时间存在环境的干扰,再此不做分析),钻孔应变 NS 向为低值变化,同期水位在平稳变化的背景下快速上升,水温上升速率变缓。即在台站 NS 向受压的状态下,赋存流体的孔隙压力增加,水位出现上升变化。由于该观测井为正温度梯度,水温上升速度减缓,表明使水位上升的主要地下水来源于水温观测层之上。当应变 NS 向下降到最低至缓慢恢复时,受力状态由受压趋向拉张,水位虽然仍偏高,但出现了转折下降变化,同期电阻率

在下降的背景上出现了转折。即在台站 NS 向拉张状态下,孔隙压力下降,水位下降,电阻率观测层含水率降低,电阻率在下降的背景下转平。刘家峡钻孔应变,虽然同期临夏测点没有异常出现或转折,但 NS 和 NE 向出现了各向异性变化,且与临夏钻孔应变 NS 向反映的应力状态一致。天水钻孔应变 NS 和 NW 向都为破年变高值异常,其中 NS 向与临夏和刘家峡钻孔应变 NS 向反映的受力方向一致。

因此,临夏水位和钻孔应变 NS 向异常不仅在时间上具有很好的协调性,而且具有阶段性配套性特征,都反映的是区域应力的变化,异常信度最高。临夏电阻率、临夏水温、刘家峡钻孔应变和武山 22 号井水氡异常虽然在时间演化上,都有与之对应的异常测项,且可以用应力变化解释异常形态的变化,但异常演化上没有阶段性特征,异常信度较低。天水钻孔应变异常演化上与其他异常在时间上不具有协调性,也没有配套性,信度最低。

2.2.2 光盖山—迭山断裂

光盖山—迭山断裂有 5 个台站出现异常,其中位于断裂东南端的 4 个台站分布在方圆 14 km 范围内,分别为武都(倾斜)、樊坝(水位)、两水(水位和应变)以及汉王(电阻率)台,宕昌(倾斜)台位于光盖山—迭山断裂北东侧且更靠近临潭—宕昌断裂,与其他 4 个台站集中区相距 78 km(图 2)。

两水为多测项测点,其水位和钻孔应变 EW 向在 2017 年 9 月同步出现异常,同期,樊坝水位和武都水管倾斜 NS 向也出现了异常变化,异常都表现为上升。2018 年 8—10 月,当两水水位由上升转为恢复性下降时,宕昌倾斜 EW 向出现了东倾异常,两水钻孔应变 NS 向由上升转平。2019 年 1—3 月出现了成组转折的协调性变化,包括汉王电阻率、两水钻孔应变 EW 向和武都水管 NS 向都转为恢复性的下降。汉王电阻异常的开始时间与其他测项不具有协调性,宕昌倾斜 EW 向异常转折时间最晚,为震前 5 个月,同期也没有其他异常开始或转折(表 1 和图 5)。

因此,两水水位、两水钻孔应变 EW 向和武都水管倾斜 NS 向异常不仅在时间演化上具有协调性,并且具有配套性,因此它们的信度最高。樊坝水位,两水钻孔 NS 向异常虽然在时间上具有协调性特征,但并没有配套性。汉王电阻率 NS 向和 EW 向以及宕昌倾斜 EW 向异常出现了配套性,但异常出现时间或转折时间与其他测项不协调,因此它们的信度较低。

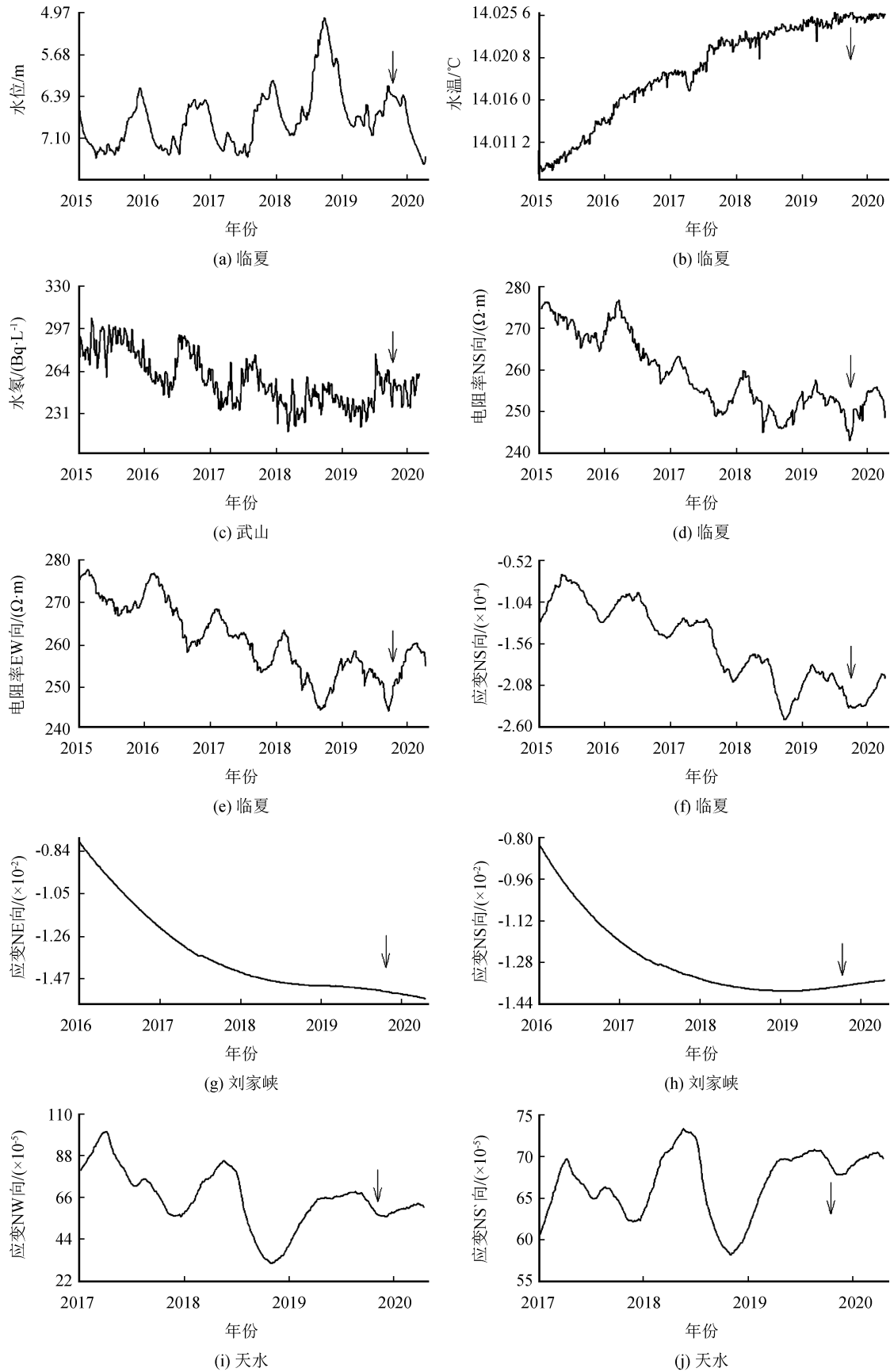


图 4 西秦岭北缘断裂地球物理定点异常曲线

Fig.4 Anomaly curves of geophysical fixed points along the northern margin fault of West Qinling

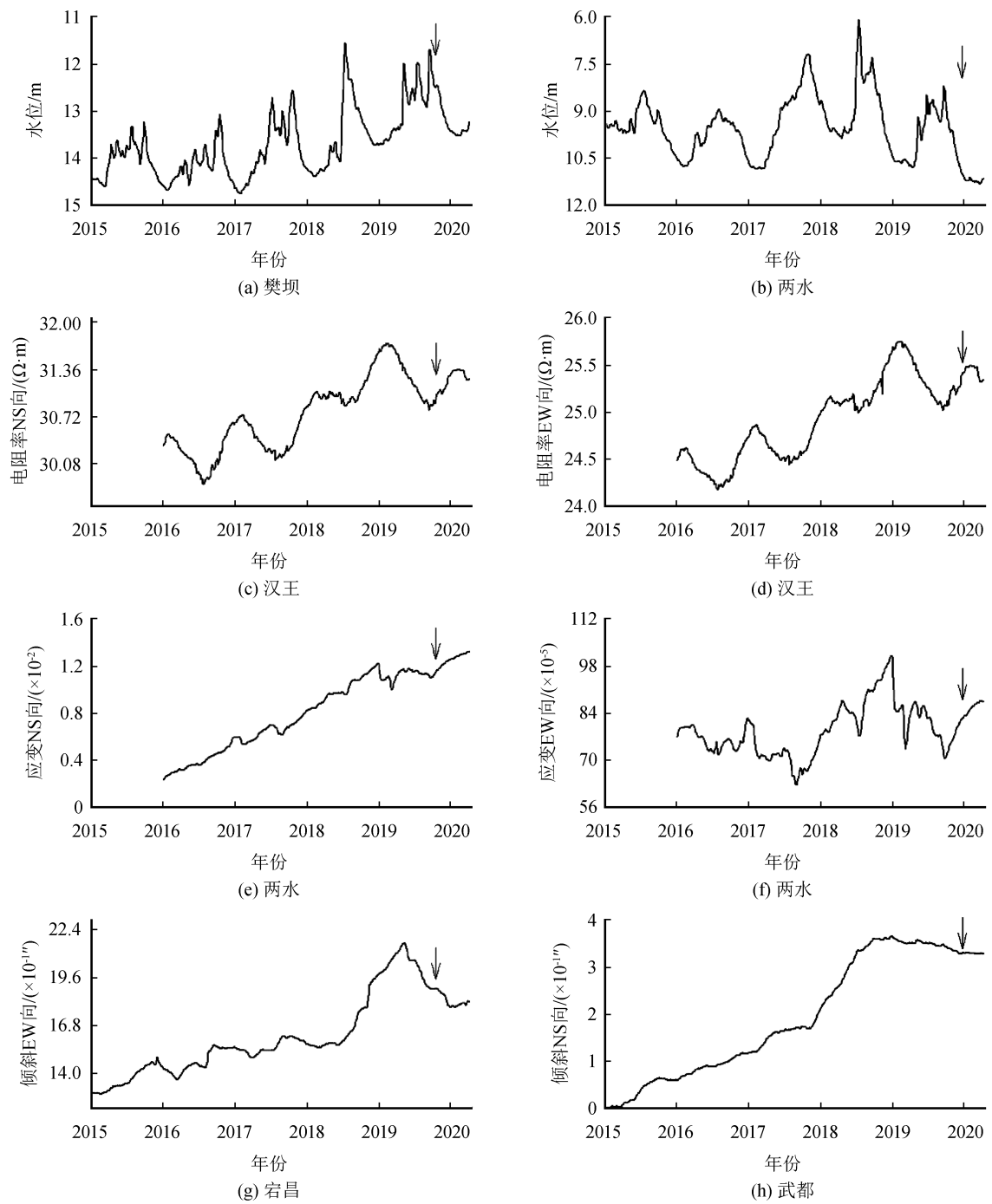


图 5 光盖山—迭山断裂地球物理定点异常曲线

Fig.5 The anomaly curves of geophysical fixed points along the Guanggaishan—Dieshan fault

2.3 地球物理场定点异常时空演化

异常集中区多学科异常的协调性变化特征是判断异常信度的主要依据之一,但作为地震异常,整个孕震区域的异常在时空演化上也相互关联且协调一致。

时间演化上(图 6),除汉王电阻率和天水应变异常的开始时间以及宕昌倾斜异常的转折时间比较离散之外,其他异常演化共经历了 3 个时段:第一时

段为震前 27~25 个月(2017 年 7—9 月),为异常开始的时间,这与《中国震例》(2011—2012)^[20]记载的 3 次 $M_s5.7\sim5.8$ 地震异常的开始时间是一致的;第二时段为震前 14~11 个月(2018 年 8—11 月),包括了异常的开始和转折;第三阶段为震前 9—7 个月(2019 年 1—3 月),主要为异常的转折。异常演化的 3 个阶段正好对应了地震孕育的 3 个阶段。

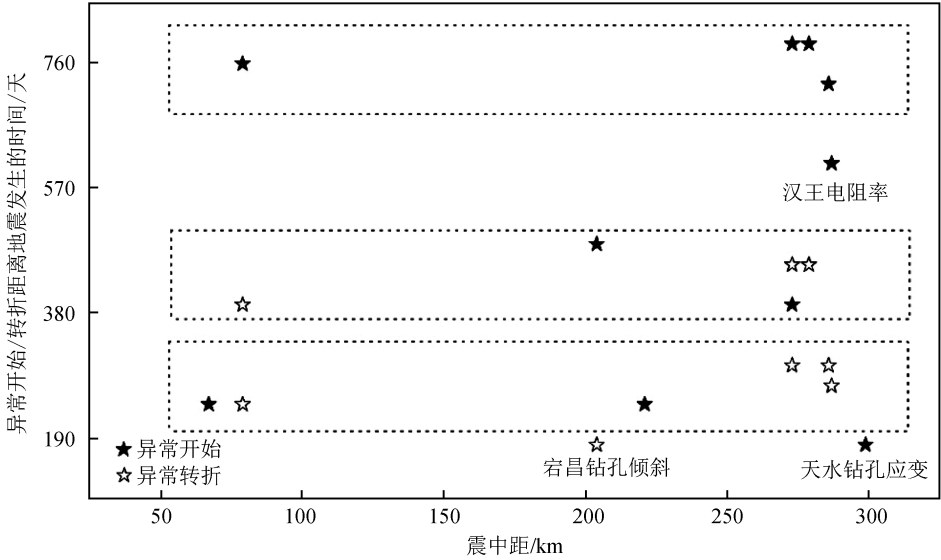


图 6 异常时空演化图

Fig.6 Temporal and spatial evolution of anomalies

空间演化上,不论哪个阶段出现或转折的异常,都分布在整个研究区域(图 6),没有明显的时空转移特征,这与《中国震例》中总结的相当震级的震例是一致的。

异常形态上,除水位为高值异常外,位于临夏地区的其他测点,主要表现为低值异常,而位于武都地区的测点,主要表现为高值异常,不同区域出现了各向异性变化。杜学彬等^[21]研究发现电阻率异常呈现出与震源机制解最大应力轴方位有关的各向异性变化。野外试验证实压应力加载过程中压应力方向电阻率呈下降变化,剪应力方向电阻率呈上升变化^[4-5,22],并且电阻率的变化不仅与孔隙饱水量有关,也与裂隙的扩展有关^[23]。根据震源机制解,夏河地震的主压应力方向为 N248°E,表明临夏地区位于主压应力区,武都地区位于剪切应力区域(图 2)。异常方向性上,临夏地区的大多为 NS 向异常,而武都地区大多为 EW 向异常,这与台站相对于震中的方位是一致的。因此两个区域异常形态的差异性变化正好反映了孕震过程中的异常变化的象限性分布特征。

因此,根据异常时空演化协调性特征,作为夏河地震的前兆异常,天水钻孔应变信度最低,其次为汉王电阻率和宕昌倾斜,其他异常信度都比较高。

2.4 震后异常变化分析

震后异常是否恢复是判断异常与地震关系的重要依据,从图 4 和图 5 可以看出,至 2020 年 4 月底,18 项异常中,12 项已经恢复或在恢复中,6 项异常

持续震前的状态,持续异常为临夏电阻率 NS、EW 向,临夏水温,武山水氡及刘家峡钻孔应变 NS、NE 向。空间上,异常持续的台站全部位于西秦岭北缘断裂两侧,并且距离震中最近的 2 个台站的 7 项异常只有临夏水位和临夏钻孔应变 NS 向 2 项异常恢复。因此,除震后未出现恢复迹象的这 6 项异常信度比较低之外,其他的信度相当,都比较高。

3 地球物理定点观测异常信度合成及结果分析

首先将各种判断方法划分的异常信度从高到低依次记为 1、2、3,再对各种异常信度划分方法赋予一定的权重,由于重复性和震后变化作为判断地震异常的依据可靠性更高,因此给它们都赋予 0.3 的权重,而其他 2 种方法赋予 0.2 的权重。同一方法下,1 的信度为 80%,2 的信度为 60%,3 的信度为 40%。由于大部分异常台站 2013 年岷县—漳县地震前没开始观测,根据概率法,这些台站异常重复性上信度都定为 50%。根据赋值利用式(1)计算出各个异常的综合信度值。

异常综合信度 = $\sum$ (信度 $\times$ 权重) (1)

表 2 显示,18 项异常的信度都在 50% 以上,表明该批异常作为夏河地震的前兆异常基本可信。其中异常信度最高的是临夏水位、临夏钻孔应变 NS 向和两水水位,信度达到了 80%,其次为两水钻孔应变 EW 向、宕昌钻孔应变 EW、武都水管倾斜 NS 向和樊坝水位,异常信度都在 70% 以上,异常信度

表 2 异常信度合成结果

Table 2 The reliability values of anomalies

台站	测项	异常重复性	多学科协调性	异常时空演化	震后变化	异常信度/%
临夏	水位	1	1	1	1	80
	水温	3	2	1	2	58
	电阻率 NS 向	-	2	1	2	61
	电阻率 EW 向	-	2	1	2	61
	钻孔应变 NS 向	1	1	1	1	80
刘家峡	钻孔应变 NS 向	-	2	1	2	61
	钻孔应变 NE 向	-	2	1	2	61
武山	水氡	2	2	1	2	64
天水	钻孔 NS 向	-	3	3	1	55
	钻孔 NW 向	-	3	3	1	55
汉王	电阻率 NS 向	-	2	2	1	63
	电阻率 EW 向	-	2	2	1	63
武都	水管倾斜 NS 向	-	1	1	1	71
两水	水位	1	1	1	1	80
	钻孔应变 NS 向	-	2	1	1	67
	钻孔应变 EW 向	-	1	1	1	71
宕昌	钻孔倾斜 EW 向	1	2	2	1	72
樊坝	水位	1	2	1	1	76

最低的为临夏水温和天水钻孔应变,信度在 55% 以下。2019 年度跟踪的 8 项异常中 5 项的信度在 70% 以上。

从空间分布来看,位于西秦岭北缘断裂带两侧的异常信度大多低于光盖山—迭山断裂附近的,特别是距离震中最近的临夏和刘家峡台站的 7 项异常中,5 项异常的信度最高才 61%,距离较远的武都地区的异常 62.5% 的异常信度在 70% 以上。从图 1 可以看出,光盖山—迭山断裂和发震断裂为东昆仑断裂向北扩展过程形成的几乎平行的两条断裂,东昆仑断裂向北挤压和向东的运动是该区域构造应力集中的主要原因,也是该区中强地震的主要孕震环境和机制^[15],由此可见光盖山—迭山断裂与地震孕育的关系更为紧密。另外信度低的异常在西秦岭北缘大断裂北侧,而地震发生在断裂南侧,是否存在大断裂的阻隔作用还需另行分析。

4 结论

对位于甘东南地区,且在西秦岭北缘和东昆仑断裂之间的地球物理定点测点 16 个台站 63 个台项进行了全时空分析,震前 9 个台站 18 个台项出现异常变化,通过异常的重复性、多学科前兆协调性、异常时空演化及震后异常变化等 4 个方面进行了分析,根据分析结果计算了各个异常的信度。

(1) 异常重复性上,临夏水位、两水水位、樊坝水位、临夏应变 NS 分量,宕昌倾斜 EW 分量异常作

为前兆异常信度最高,其次为武山 22 号井水氡,临夏水温最低。

(2) 多学科前兆协调性上,临夏水位、临夏钻孔应变 NS 向、两水水位、两水钻孔应变 EW 向、武都水管倾斜 NS 向和作为前兆异常信度最高,临夏电阻率、临夏水温、刘家峡钻孔应变和武山 22 号井水氡、樊坝水位,两水钻孔 NS 向、宕昌倾斜 EW 向及汉王电阻率 NS 向和 EW 向异常相对较低,天水钻孔应变信度最低。

(3) 异常时空演化上,天水钻孔应变信度最低,其次为汉王电阻率和宕昌倾斜,其他异常信度都比较高。

(4) 震后异常变化上,震后半年,与震中构造更加密切的光盖山—迭山断裂东南端的异常完全恢复,距离震中较近的临夏和刘家峡异常大多未恢复。

(5) 异常信度合成结果显示,本文提取出的异常信度都在 50% 以上,表明这些异常作为夏河地震的异常基本可信,但信度上存在差别,天水钻孔和临夏水温信度最低,低于 55%,临夏水位、两水水位和临夏钻孔 NS 向信度最高,达到了 80%。从学科来看,流体类异常信度较高,其次为形变类;从空间上来看,信度较低的异常台站位于西秦岭北缘断裂北侧,特别是距离震中最近临夏和刘家峡地区,这与区域构造应力的集中有关,是否还存在深大断裂的阻隔作用还需以后深入分析。该研究结果也证实离开构造背景仅从几何距离确定地震异常的范围存在着

不合理性。

参考文献(References)

- [1] 刘耀炜,施锦,潘树新,等.川滇地区地下流体中短期前兆识别和区域性特征[J].地震,2002,22(1):17-24.
LIU Yaowei, SHI Jin, PAN Shuxin, et al. Discrimination and regional features of medium-and short-term precursors of ground fluid in Sichuan—Yunnan region[J].Earthquake,2002,22(1):17-24.
- [2] 晏锐,黄辅琼,顾瑾平.中国大陆 7 级强震前地下流体前兆时空特征[J].地震,2004,24(1):126-131.
YAN Rui, HUANG Fuqiong, GU Jinping. Spatial-temporal characteristics of precursory anomaly of underground fluid before $M_s7.0$ strong earthquakes in China's continent[J].Earthquake,2004,24(1):126-131.
- [3] 张小涛,宋治平,李纲.九寨沟 $M_s7.0$ 地震的前兆异常时空演化特征及其分析[J].中国地震,2018,34(4):772-780.
ZHANG Xiaotao, SONG Zhiping, LI Gang. temporal and spatial evolution of precursory anomalies of the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake and its analysis[J].Earthquake Research in China,2018,34(4):772-780.
- [4] 赵玉林,钱复业,杨体成,等.原地电阻率变化的试验[J].地震学报,1983,5(2):217-225.
ZHAO Yulin, QIAN Fuye, YANG Tichen, et al. Experimental in situ of electrical resistivity changes[J].Acta Seismologica Sinica (in Chinese),1983,5(2):217-225.
- [5] 杜学彬.在地震预报中的两类视电阻率变化[J].中国科学(地球科学),2010,40(10):1321-1330.
DU Xuebin. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction[J].Science China (Earth Sciences),2010,40(10):1321-1330.
- [6] 钱复业,卢振业,丁鉴海,等.电磁学分析方法[M].北京:地震出版社,1998.
QIAN Fuye, LU Zhenye, DING Jianhai. Electromagnetic analysis and prediction methods[M]. Beijing: Seismological Press, 1998.
- [7] 牛安福,张凌空,李媛,等.芦山 $M_s7.0$ 地震前的形变空区特征研究[J].震灾防御技术,2013,8(4):341-350.
NIU Anfu, ZHANG Lingkong, LI Yuan, et al. On the weak deformation area prior to the Lushan $M_s7.0$ earthquake[J].Technology for Earthquake Disaster Prevention,2013,8(4):341-350.
- [8] 解滔,刘杰,卢军,等.2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前定点观测电磁异常回溯性分析[J].地球物理学报,2018,61(5):1922-1937.
XIE Tao, LIU Jie, LU Jun, et al. Retrospective analysis on electromagnetic anomalies observed by ground fixed station before the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(5):1922-1937.
- [9] 晏锐,田雷,王广才,等.2008 年汶川 8.0 级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析[J].地球物理学报,2018,61(5):1907-1921.
YAN Rui, TIAN Lei, WANG Guangcai, et al. Review and statistically characteristic analysis of underground fluid anomalies prior to the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(5):1907-1921.
- [10] 郑文俊,袁道阳,何文贵,等.甘肃东南地区构造活动与 2013 年岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震震害机制[J].地球物理学报,2013,56(12):4058-4071.
ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, HE Wengui, et al. Geometric pattern and active tectonics in southeastern Gansu province: discussion on seismogenic mechanism of the Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake on July 22,2013[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(12):4058-4071.
- [11] 马小平,孙艳萍,陈文凯,等.甘肃夏河 $M_s5.7$ 地震烈度评定及震害特征分析[J].地震工程学报,2020,42(3):777-783.
MA Xiaoping, SUN Yanping, CHEN Wenkai, et al. Seismic intensity evaluation and damage characteristics of Xiahe, Gansu $M_s5.7$ earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):777-783.
- [12] 何文贵,郑文俊,王爱国,等.临潭—宕昌断裂新活动特征与岷县—漳县 $M_s6.6$ 地震关系研究[J].地震工程学报,2013,35(4):751-760.
HE Wengui, ZHENG Wenjun, WANG Aiguo, et al. New activities of Lintan—Dangchang fault and its relations to Minxian—Zhangxian $M_s6.6$ earthquake[J].China Earthquake Engineering Journal,2013,35(4):751-760.
- [13] 郑文俊,雷中生,袁道阳,等.1837 年甘肃岷县北 6 级地震考证与发震构造分析[J].地震,2007,27(1):120-130.
ZHENG Wenjun, LEI Zhongsheng, YUAN Daoyang, et al. Structural research on the 1837 northern Minxian M_6 earthquake in Gansu province and its causative structure[J].Earthquake,2007,27(1):120-130.
- [14] 俞晶星,郑文俊,袁道阳,等.西秦岭西段光盖山—迭山断裂带坪定—化马断裂的新活动性与滑动速率[J].第四纪研究,2012,32(5):957-967.
YU Jingxing, ZHENG Wenjun, YUAN Daoyang, et al. Late quaternary active characteristics and slip-rate of Pingding—Huama fault, the eastern segment of Guanggaishan—Dieshan fault zone (West Qinling Mountain)[J].Quaternary Sciences,2012,32(5):957-967.
- [15] 曹玲玲,刘耀炜,潘树新.强震多学科前兆协调性特征分析[J].地震,2002,22(4):49-54.
CAO Lingling, LIU Yaowei, PAN Shuxin. Study on multidiscipline precursory harmonious characteristics of strong earthquakes[J].Earthquake,2002,22(4):49-54.
- [16] 杜学彬,孙君嵩,陈军营.地震预测中的地电阻率数据处理方法[J].地震学报,2017,39(4):531-548.
DU Xuebin, SUN Junsong, CHEN Junying. Processing methods for the observation data of georesistivity in earthquake

prediction[J].Acta Seismologica Sinica,2017,39(4):531-548.

[17] 晏锐,蒋长胜,张浪平.汶川 8.0 级地震前水氡浓度的临界漫化现象研究[J].地球物理学报,2011,54(7):1817-1826.

YAN R,JIANG C S,ZHANH L P.Study on critical slowing down phenomenon of radon concentrations in water before the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,2011,54(7):1817-1826.

[18] 孙小龙,王广才,晏锐.利用概率密度分布提取流体观测资料中的高频异常信息:以 2008 年汶川 8.0 级地震为例[J].地球物理学报,2016,59(5):1673-1684.

SUN Xiaolong,WANG Guangcai,YAN Rui.Extracting high-frequency anomaly information from fluid observational data: a case study of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of 2008[J]. Chinese Journal of Geophysics,2016,59(5):1673-1684.

[19] 龚丽文,刘琦,张治广,等.2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震形变高频信息异常与前兆机理浅析[J].地震,2019,39(1):101-113.

GONG Liwen, LIU Qi, ZHANG Zhiguang, et al. High-frequency information anomalies of deformation and its precursory mechanism before the Ludian $M_s6.5$ earthquake[J]. Earthquake,2019,39(1):101-113.

[20] 蒋海坤.中国震例(2011—2012)[M].北京:地震出版社,2018: 25-66,132-154,403-435.

JIANG Haikun.Earthquake cases in China(2011—2012)[M]. Beijing:Seismologica Press,2018:25-66,132-154,403-435.

[21] 杜学彬,马占虎,叶青,等.与强震有关的视电阻率各向异性变化[J].地球物理学进展,2006,21(1):1-8.

DU Xuebin,MA Zhanhu,YE Qing,et al.Anisotropic changes in apparent resistivity associated with strong earthquake[J]. Progress in Geophysics,2006,21(1):93-100.

[22] JOUNIAUX L,ZAMORA M,REUSHL T.Electrical conductivity of non-saturated carbonate rocks during deformation up to failure[J].Geophysical Journal International,2006,167(2):1071-1026.

[23] 解滔,卢军.含裂隙介质中的视电阻率各向异性变化[J].地球物理学报,2020,63(4):1675-1394.

XIE Tao,LU Jun.Apparent resistivity anisotropic variations in cracked medium[J].Chinese Journal of Geophysics,2020, 63(4):1675-1394.



(上接第 1262 页)

FANG Shengming,ZHANG Xiankang,JIA Shixu,et al.Multis-scale decomposition of bouguer gravity anomaly and seismic activity in North China[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2002,22(1):34-39.

[17] 张成科,赵金仁,任青芳,等.豫北及其外围地区地壳上地幔结构研究[J].地震地质,1994,16(3):243-253.

ZHANG Chengke,ZHAO Jinren,REN Qingfang,et al.Study on crust and upper mantle structure in north Henan and its surroundings[J].Seismology and Geology,1994,16(3):243-253.

[18] 江娃利,刘仲温,李咸业,等.1830 年河北磁县强震区活动构造初步研究[J].华北地震科学,1994,12(1):21-27.

JIANG Wali,LIU Zhongwen,LI Xianye,et al.Preliminary study of active structure of the 1830 Cixian strong earthquake area in Hebei Province[J].North China Earthquake Sciences, 1994,12(1):21-27.

[19] 徐志萍,姜磊,杨利普,等.利用布格重力资料研究太行山东南缘断裂构造特征[J].大地测量与地球动力学,2015,35(3): 503-507.

XU Zhiping,JIANG Lei,YANG Lipu,et al.Structure characteristics of faults in the southeast segment of Taihang Mountain using bouguer gravity data[J].Journal of Geodesy and Geodynamics,2015,35(3):503-507.