

张远富,姚玉霞,赵斐,等.利用地电场线性极化特性提取地震前兆异常的方法研究[J].地震工程学报,2020,42(3):688-695.
doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.688
ZHANG Yuanfu, YAO Yuxia, ZHAO Fei, et al. Method of Extracting Earthquake Precursor Anomalies Based on the Linear Polarization Characteristics of a Geoelectric Field[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 688-695. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.688

利用地电场线性极化特性提取 地震前兆异常的方法研究

张远富^{1,2}, 姚玉霞^{1,2}, 赵 斐^{1,2}, 李旭升^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000;

2. 甘肃省地震局平凉中心地震台, 甘肃 平凉 744000)

摘要: 处理平凉台 2008—2017 年的地电场观测资料, 首先对地电场线性极化和非极化异常进行分析, 提出利用地电场线性极化特性提取地震前兆异常的方法。其次, 采用相关数据处理和计算方法对周期性质、极化系数、极化方向、垂直极化方向上的投影等进行讨论, 结果表明平凉台地电场线性极化正常背景特征为: 极化方向变化范围 $N(66.7 \pm 6)^\circ E$, 极化系数在 0.7~1 之间, 垂直极化方向上的投影值波动范围 $(-0.53 \sim 2.61) \text{ mV/km}$ 。最后, 统计分析平凉台周边中强地震与地电场非线性极化异常的关系, 认为平凉台地电场对中强地震有较好的映震能力, 地电场非极化异常可以作为判断地震前兆异常的一个重要指标, 其异常表现为: 从震前非极化到震后恢复极化的一个过程, 持续时间一般在 4~15 天, 多出现在震前 5 天到 1 个月不等。

关键词: 平凉; 地电场; 极化系数; 极化方向; 非极化异常

中图分类号: P315.72⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)03-0688-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.688

Method of Extracting Earthquake Precursor Anomalies Based on the Linear Polarization Characteristics of a Geoelectric Field

ZHANG Yuanfu^{1,2}, YAO Yuxia^{1,2}, ZHAO Fei^{1,2}, LI Xusheng^{1,2}

(1. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 73000, Gansu, China;

2. Pingliang Seismic Station, Gansu Earthquake Agency, Pingliang 744000, Gansu, China)

Abstract: In this study, the observation data of a geoelectric field at Pingliang Station were collected from 2008 to 2017. The linear polarization and nonpolarization anomalies of the geoelectric field were analyzed, and a method for extracting seismic precursor anomalies was proposed on the basis of the linear polarization characteristics of the geoelectric field. Periodic properties, polarization coefficient, polarization direction, and projection in a vertical polarization direction were discussed with a relative data processing method. The following normal background characteristics

收稿日期: 2019-06-05

基金项目: 甘肃省地震局科技发展青年基金(2019Q10); 中国地震局地震监测运维专项“全国地球物理台网数据跟踪分析与产出”; 中国地震局三结合项目(3JH-201902012); 国家自然科学基金(A413740808)

第一作者简介: 张远富(1985—), 男, 工程师, 主要从事地震前兆监测及研究工作。E-mail: bryantomzyf@163.com。

of the linear polarization of the geoelectric field at Pingliang Station were obtained. The polarization direction varies within $N(66.7 \pm 6)^\circ E$, and the polarization coefficient is between 0.7 and 1. The fluctuation range of the projection value in the vertical polarization direction varies from -0.53 mV/km to 2.61 mV/km . The relationship between moderate and strong earthquakes around Pingliang Station and the nonpolarization anomaly of the geoelectric field was analyzed statistically. Results showed that the geoelectric field at this station can reflect earthquakes. The nonpolarization anomaly of the geoelectric field can be used as an important indicator of earthquake precursor anomalies; that is, the duration from nonpolarization before the earthquake to polarization recovery after the earthquake generally ranges from 4 days to 15 days and occurs mostly within 5 days to 1 month before the earthquake.

Keywords: Pingliang; geoelectric field; polarization coefficient; polarization direction; non-polarization anomaly

0 引言

地电场是地球电磁环境中固有的物理场之一,我国自 20 世纪 60 年代起就开展了地电场观测并用于地震监测、预测和研究中^[1-2]。近年来随着数字化测量仪器、固体不极化电极的应用以及现代化数据传输和处理技术的发展,地电场观测技术和方法理论有了长足进步,观测数据应用方面也取得了很大进展^[3-8]。由于地电场观测易受场地条件、电磁环境、观测装置和仪器等因素的影响,地震异常电信号和各种干扰信号常混杂于正常变化的背景值中不易识别,因此如何从观测资料中提取可靠的地震前兆,是地震短临预报的关键技术之一^[9]。地电场受控于地球外部各种电流体系和地球内部介质的电性性质,大地电场在很多情况下是线性极化的^[10-11]。平凉台地电场观测点位于南北地震带中北段,台址周围构造较发育,观测资料质量较好,多次中强地震前均出现明显的短临异常^[12-13]。本文主要以该台观测资料为研究对象,拟通过对地电场 NS 与 EW 两垂向测值的矢量关系、线性极化特征以及垂直极化方向的投影等方面进行分析研究,以期探索从观测资料中提取地震前兆异常的数据分析方法,更好地发挥地电场在地震预测方面的作用。另外,数据跟踪分析是地震台站一线工作人员的常态化工作任务,现阶段推行的前兆观测数据跟踪分析软件多利用时序图进行分析,方法相对单一,本文拟通过对原始数据的二次处理,探索地电场数据跟踪分析的新方法。

1 台站情况简介

平凉台地电场观测点始建于 2007 年,位于甘肃省平凉市静宁县靳家寺村($35.5^\circ N, 105.7^\circ E$)。台址

周围地质构造较发育,如图 1(a)所示主要有海原断裂、六盘山断裂、罗山—云雾山断裂、会宁—义岗断裂,地形为河谷川地。布极方式为 L 型,如图 1(b)所示分为 3 个测向: NS、EW 和 $N45^\circ W$,在每个测向布设两组极距,长极距为 300 m,短极距为 200 m,电极埋深约 3 m。2015 年 11 月电极更换成 LGB-3 型不极化电极。仪器型号为 ZD9A-II 地电场仪。测区位于农田中,无明显的干扰源,装置系统工作稳定,观测资料连续可靠。

2 地电场的线性极化特性

地电场可分为大地电场和自然电场两部分,大地电场主要受高空电流体系影响,自然电场则是由于地壳中各种物理、化学作用形成的^[14]。相关研究发现大地电场在很多情况下是线性极化的,地电场极化特性是指采用地电场的 NS 和 EW 两个方向的数值分别为坐标系的纵、横坐标轴所生成的图形变化特征^[15]。一些台站的资料并不是呈线性极化的,主要是因为大地电场、自然电场及噪声信号是叠加在一起的,特别是台站地下电性结构的非均匀性会对其造成很大影响。图 2(a)为平凉台 2017 年 6 月地电场原始分钟值曲线,以 NS 测向为纵轴、EW 测向为横轴绘制散点图,并用回归分析的方法拟合出最佳回归直线。如图 2(b)所示,可以发现各变化点基本落在一条直线附近,呈现出一种准线性极化现象。该结果表明通常情况下平凉台地电场 NS 和 EW 分量是呈线性相关的。

当观测值中含有异常电信号时,尤其是 NS、EW 两个测向接收到不均匀变化的场强时,各变化点则会变得离散,出现非线性极化现象。例如:电磁

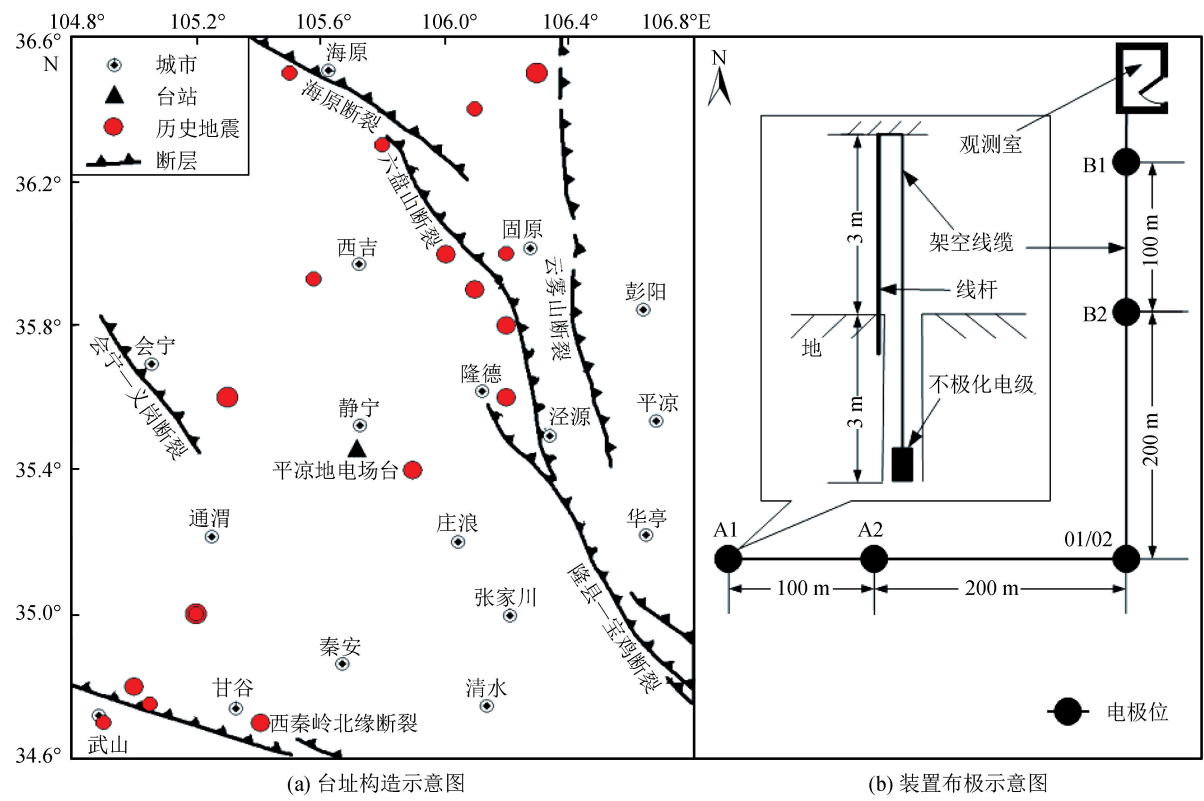


图 1 平凉地电场台址构造及装置布极示意图

Fig.1 The sketch map of tectonic structure and device layout in Pingliang geoelectric station

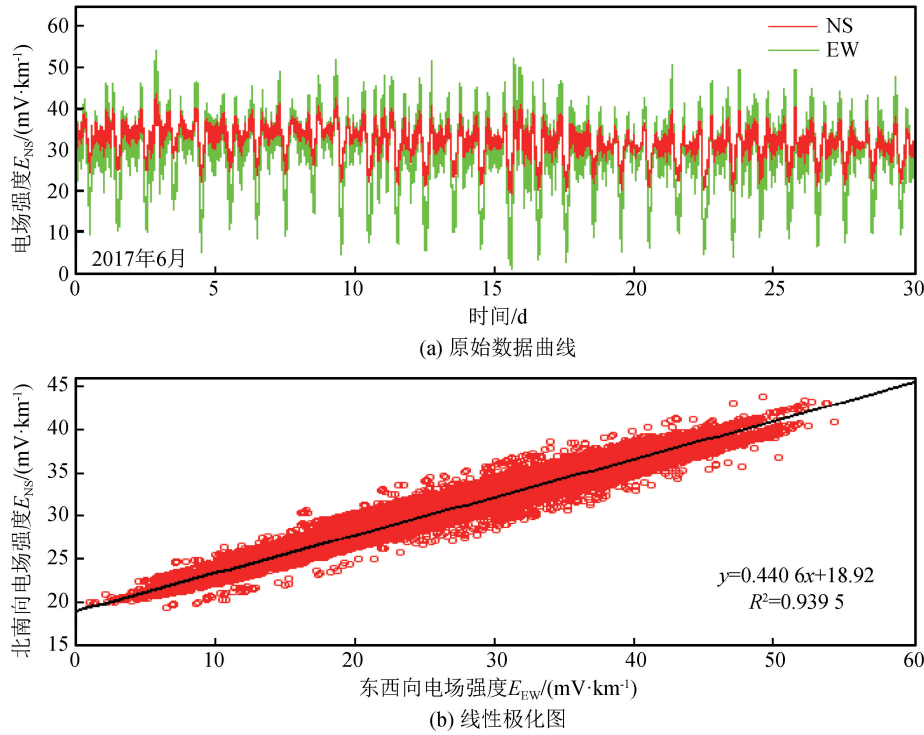


图 2 地电场线性极化现象

Fig.2 The phenomenon of linear polarization of geo-electric field

暴、环境干扰、人为干扰、工频电磁干扰、地震异常电信号等。图 3(a)是磁暴时(2015 年 3 月 17—18 日, $K=7$) 平凉台地电场极化图,显然各变化点是非常离散的,极化系数仅为 0.082 6。图 3(b)是测区农

田大面积灌溉时(2015 年 3 月 21—26 日)平凉台地电场极化图,NS 测向和 EW 测向的测值完全不存在线性关系,出现了非极化现象。图 3(c)是强降雨时(2013 年 7 月 26—29 日)平凉台地电场极化图,同样出现了非极化现象。除了自然环境的变化和人为干扰会造成地电场非线性极化现象外,地震异常电信号同样也会造成非线性极化,如 2008 年 5 月 12 日在四川汶川发生 $M_s8.0$ 地震,至平凉台的震中距为 554 km,震前 18 天出现了非线性极化现象,共持续了 6 天,如图 3(d)所示;2013 年 4 月 20 日在四川芦山发生 $M_s7.0$ 地震,震中距 641 km,从图 3(e)来看和汶川地震的异常是十分相似的,震前 14 天出

现非线性极化现象,共持续 9 天,震后恢复极化;2013 年 7 月 22 日在甘肃岷县漳县交界发生 $M_s6.6$ 地震,震中距 217 km,如图 3(f)所示,与前两次地震不同的是分别在震前 19 天、12 天出现两次非线性极化现象,持续时间分别为 4 天、5 天,震后又恢复极化。值得说明的一点是环境干扰与地震异常相比,非线性极化异常更明显,甚至极化方向会出现反向变化。上述研究表明平凉台地电场 NS 和 EW 两个分量通常情况下是线性相关的(极化的),在环境干扰或地震时会变得非线性极化,据此可通过研究它的极化特征,如极化方向、极化系数、垂直极化方向上的投影等提取到地震前兆异常。

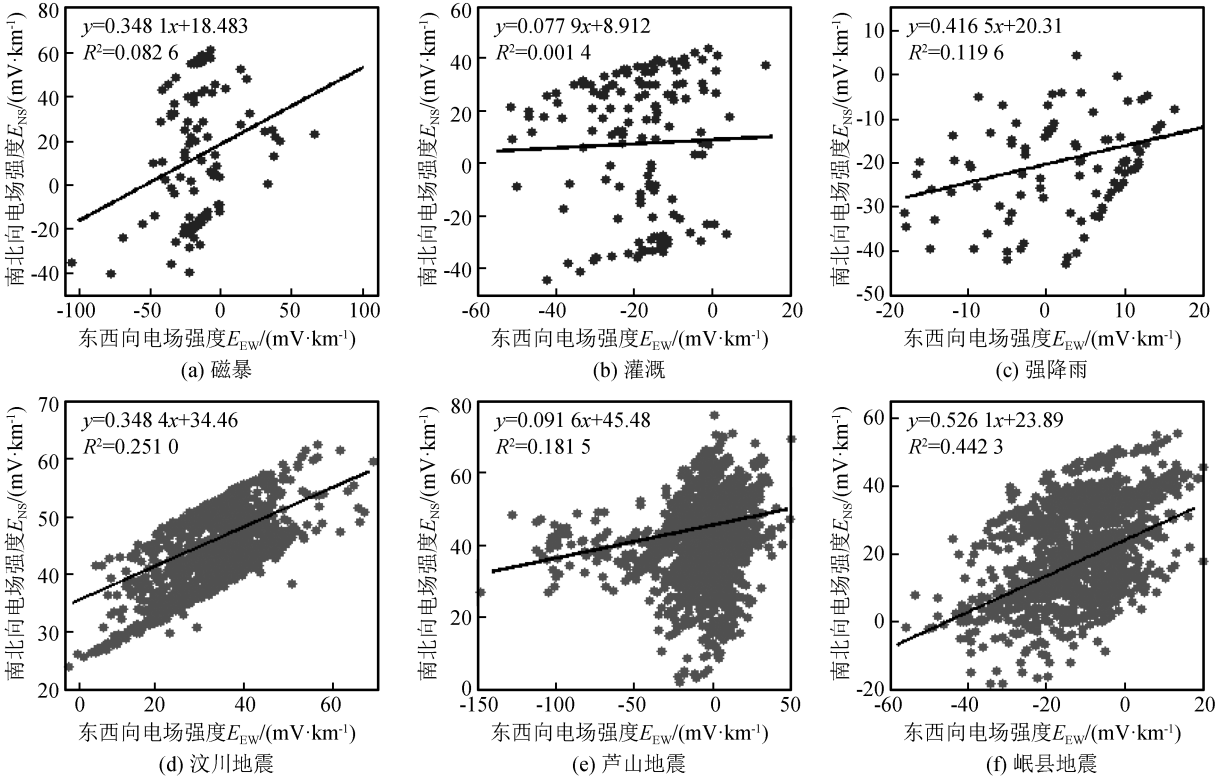


图 3 地电场非极化异常

Fig.3 Abnormality of non-polarization of geo-electric field

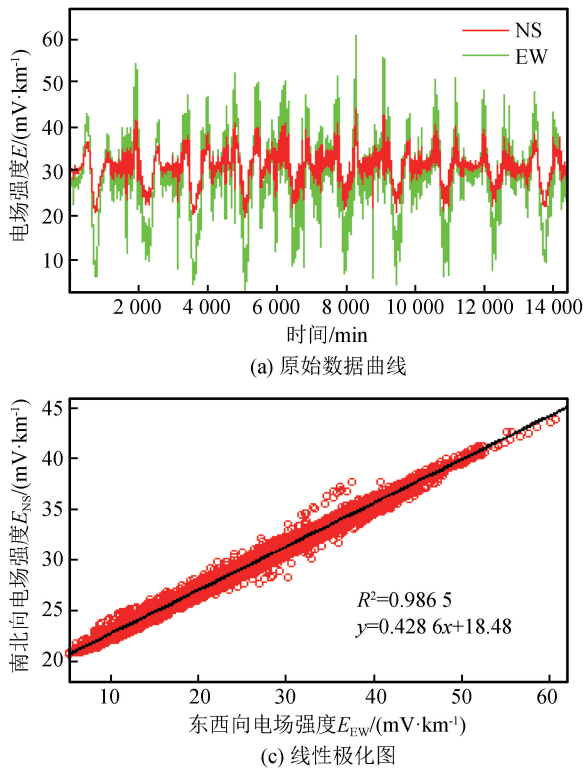
3 数据处理及计算

考虑到环境干扰会把地震异常信息掩盖,并且观测值中存在长趋势变化(太阳活动、季节变化等)和环境干扰(降雨、大风、灌溉等),因此为了减少干扰事件对分析结果的影响,采用滤波、趋势消除等方法去除这些干扰因素。本文首先对原始分钟值数据人工剔除干扰突跳数据,再进行滤波、趋势消除等处理,最后换算出时均值和日均值进行分析。

3.1 周期计算

地电场的极化方向并不是固定不变的,它随地电场自身的固有周期而变化,因此首先需要进行频谱分析确定它的周期,再结合不同的周期选择多长时间段的资料来确定极化方向才更加合理。本文采用快速傅氏变换 FFT 方法通过 matlab 程序进行计算。快速傅里叶变换是离散傅里叶变换的快速算法,是估算一段观测数据中周期成分的常用方法,计算速度快,但要求数据长度 $N=n^2$ (n 为正整数),同

时满足 $N \gg T$ (T 为拟分辨的周期成分的周期) 才能解析出谱成分^[16]。因此数据长度 N 选取为 10 天以上(即 $N \geq 10 T$), 且该时段无电磁环境干扰。



样本数据曲线见图 4(a), 周期计算结果如图 4(b) 所示, 从图中可以看出平凉台地电场在正常时段内具有 6、8、12、24 小时显著周期成分。

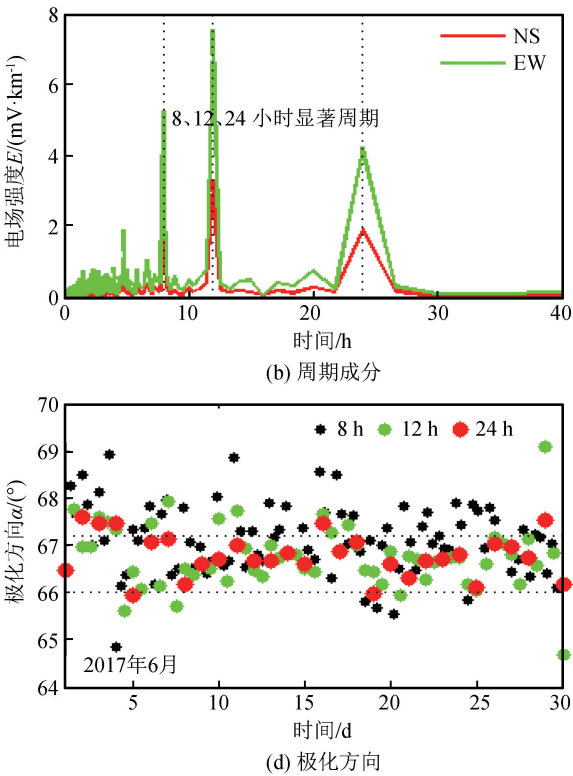


图 4 试算结果

Fig.4 Trial calculation results

3.2 极化方向

在图 4(c) 中以回归分析方法拟合的直线为极化直线, 该直线与纵轴的夹角即为极化方向, 用 α 表示。若极化直线方程为 $y = ax + b$, 则极化方向 α 可用式(1)进行计算。

$$\alpha = \operatorname{arccot}(a)$$
 (1)

在地电场观测中, 通常规定地电场由北向南为正方向, 由东向西也为正方向, 因此本文设定极化方向是北偏东时为正方向。结合上述周期计算结果, 分别以 8、12、24 小时不同时长对平凉台 2017 年 6 月地电场的极化方向进行计算。结果如图 4(d) 所示。不难看出 8 小时的结果比较离散, 12 小时和 24 小时的变化接近, 但 24 小时的极化方向最稳定, 因此选择 24 小时时长的资料进行极化分析较为合理。利用平凉台的地电场观测数据, 通常计算的岩体裂隙优势方位变化范围在 $N(67 \pm 3)^{\circ}E$ (或 $S(67 \pm 3)^{\circ}W$) 以内^[17], 而本文计算的极化方向变化范围为 $N(66.7 \pm 0.5)^{\circ}E$, 二者结果一致, 证明该计算结果是可信的, 同时也说明极化方向与测区岩体裂隙优势

方位关系密切。

3.3 极化系数

统计学中, 皮尔逊积矩相关系数 (Pearson product-moment correlation coefficient, PMCC) 常用来衡量两个数据集是否在同一条线上, 取值范围介于 -1 和 $+1$ 之间^[18]。本文取 Pearson 相关系数的绝对值作为极化系数, 用来度量 NS 和 EW 两个电场分量的线性相关的强弱, 用 R 表示。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{\left(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}\right) \left(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N}\right)}}$$
 (2)

式中: X 为地电场 EW 分量; Y 为地电场 NS 分量; N 为选取时段的样本总量; R 表示选取时段内的极化系数。当 $0 < R < 1$ 时, 表示两分量存在一定程度的线性极化相关; R 越接近 1, 表示两个分量线性极化程度越高; R 越接近于 0, 表示两个分量的线性极

化程度越低。

3.4 垂直极化方向上的投影

相关研究表明,通过垂直极化方向上的投影可达到分离正常变化与异常信号的目的^[19]。其计算方法为:(1)将 NS 和 EW 两个分量在同一时刻的电场观测值进行矢量合成,找出每一时刻的极化点位置;(2)根据线性回归计算确定极化方向和极化直线方程;(3)对原坐标作平移、旋转,使新坐标的横轴与回归直线重合;(4)将各极化点投影到新坐标轴的纵轴上。设某一时刻 NS 分量测值为 y_0 ,EW 分量测值为 x_0 ,极化直线方程为 $y=ax+b$,则该极化点的电场强度投影值用 E_r 表示,可用式(3)进行计算。

$$E_r = \frac{|y_0 - a x_0 - b|}{\sqrt{1 + a^2}}$$

(3)

4 计算结果及讨论

按照上述方法原理和选定的时间间隔对平凉台 2008—2017 年的地电场观测资料逐天进行计算,结果显示平凉台地电场线性极化正常背景特征为:极

化方向变化范围在 $N(66.7 \pm 6)^\circ E$ 以内,极化系数在 $0.7 \sim 1.0$ 之间,垂直极化方向上的投影值波动范围为 $(-0.53 \sim 2.61) \text{ mV/km}$ 。若超出该背景变化范围则认为非极化异常,从图 5 可以看出平凉台地电场非极化异常与地震活动对应关系较好,如 2009—2012 年和 2016 年地震活动水平较低,各极化参数波动都较小,基本没有异常。而 2008 年、2013—2014 年以及 2017 年地震活动水平较高,各极化参数也变得比较离散,提取到了十分明显的非极化异常。在日常做数据跟踪分析时,根据地电场的观测特点需要对每个测道分开绘制时序图,若数据中存在长趋势变化或环境干扰,曲线整体异常信息会被压制。而利用本方法可缩减图件数一半,而异常判定指标多出 3 倍,尤其是垂直极化方向上的投影如图 5(c),可将正常背景限制在一个很小的区间,起到归一化的效果,从而凸显了异常信息。另外上述数据处理方法十分简便,嵌套在数据跟踪分析软件里是很容易的,因此该方法应用于地电场数据跟踪分析是有效可行的。

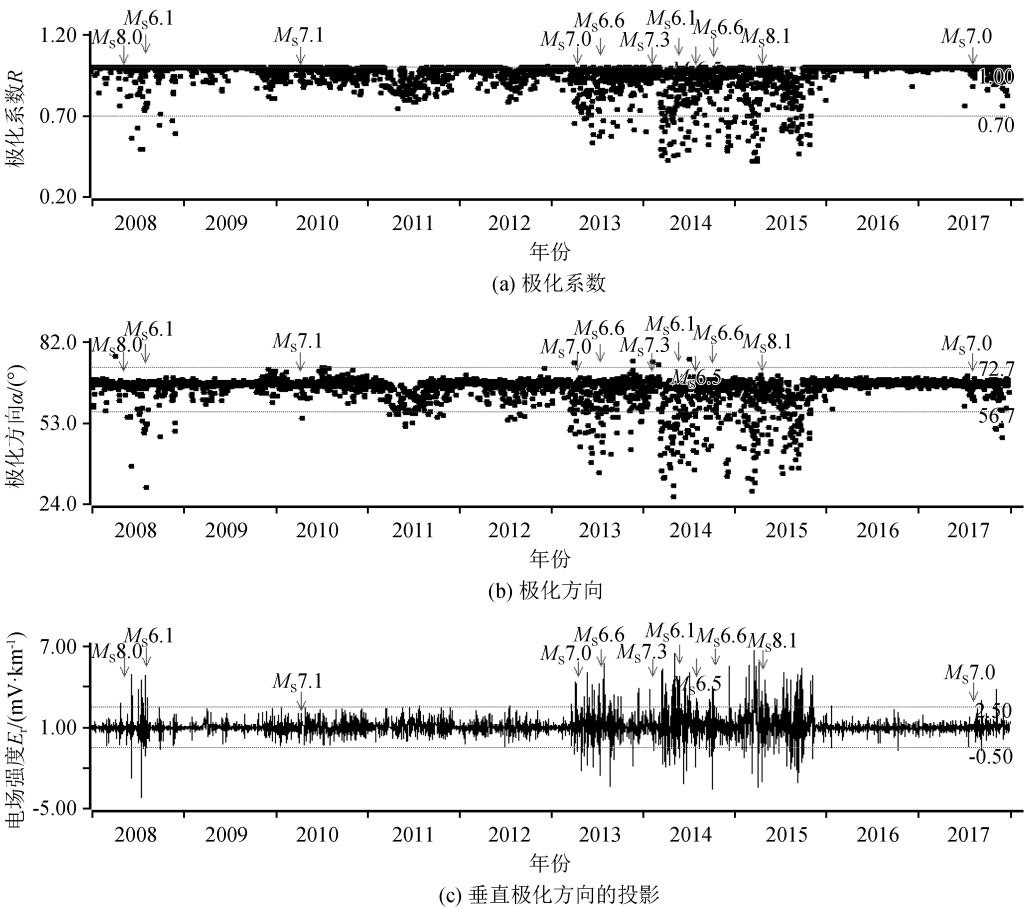


图 5 平凉台地电场线性极化计算结果

Fig.5 Calculation results of linear polarization of geo-electric field in Pingliang station

通过详细的统计和计算得到地震和地电场非极化异常变化存在一定的关系(表 1)。在平凉及周边统计到了 18 次中强地震($M_s>5$),其中 12 次地震前均出现了明显的异常变化,出现 15 次类似的异常,并没有发生地震(准确率 36.3%),说明平凉台地电场非极化异常对中强地震有较好的映震能力,地

电场非极化异常可以作为判断地震前兆异常的一个重要指标。从非极化异常参数统计来看,与地震相关的异常特征主要表现为:异常出现在震前 5 天到 1 个月,异常结束后发震;异常持续时间为 4~15 天。另外多次类似的异常没有对应地震,可能是降雨或人为干扰造成的,也可能是震级较小,从而导致

表 1 平凉台地电场非极化异常统计表

Table 1 Abnormal statistics of non-polarization of geo-electric field in Pingliang station

震级/ M_s	发震时间	震中距 /km	异常起始 时间	持续时间 /d	非极化异常参数		
					$E_r/(\text{mV} \cdot \text{km}^{-1})$	$\alpha/(^{\circ})$	R
汶川 8.0	2008-05-12	554	2008-04-22	6	3.16	6.75	0.62
宁强 5.7	2008-05-27	290	-	-	-	-	-
-	-	-	2008-06-05	5	6.17	22.76	0.56
青川 6.0	2008-07-24	292	2008-07-13	6	8.28	7.43	0.49
青川 6.1	2008-08-05	292	2008-07-24	12	5.75	18.83	0.62
武都 5.5	2008-09-12	279	-	-	-	-	-
-	-	-	2008-11-22	9	2.46	9.82	0.59
青川 5.1	2009-09-19	290	-	-	-	-	-
玉树 7.1	2010-04-14	926	-	-	-	-	-
芦山 7.0	2013-04-20	641	2013-04-04	7	5.23	24.91	0.62
-	-	-	2013-06-09	8	5.69	28.16	0.53
岷县 6.6	2013 07 22	217	2013-07-05	13	6.51	31.52	0.55
-	-	-	2013-07-26	9	5.67	23.14	0.59
贡县 6.1	2013-08-12	980	-	-	-	-	-
于田 7.3	2014-02-12	2150	-	-	-	-	-
-	-	-	2014-03-16	8	7.18	29.70	0.46
-	-	-	2014-05-02	11	7.98	39.16	0.47
盈江 6.1	2014-05-30	1411	2014-05-22	5	5.89	23.19	0.48
-	-	-	2014-07-03	6	3.57	26.44	0.49
鲁甸 6.5	2014-08 03	960	2014-07-26	8	3.23	29.11	0.55
景谷 6.6	2014-10-07	1442	2014-09-20	4	2.43	22.58	0.52
-	-	-	2014-10-03	6	7.56	28.41	0.68
康定 6.3	2014-11-22	708	-	-	-	-	-
-	-	-	2014-12-01	12	6.27	32.16	0.48
-	-	-	2015-03-13	4	7.22	37.02	0.42
尼泊尔 8.1	2015-04-25	2189	2015-04-23	15	8.98	35.66	0.41
尼泊尔 7.5	2015-05-12	2088	-	-	-	-	-
-	-	-	2015-07-11	6	5.16	31.59	0.61
-	-	-	2015-09 16	5	7.17	29.01	0.45
-	-	-	2015-10-28	7	5.51	19.11	0.51
九寨沟 7.0	2017-08-08	278	2017-08-03	6	2.24	8.23	0.69
-	-	-	2017-11-07	5	3.51	16.45	0.67
-	-	-	2017-11-27	8	2.06	19.01	0.66

注: E_r 为垂直极化方向的电场强度投影值; α 为极化方向角; R 为极化系数。

本课题未统计到。而多次地震前没有出现相似的异常,可能是震源距离较远、震级较小、地质构造差异等原因造成的。

5 主要结论

通过以上研究,本文得到以下主要结论:

(1) 平凉台地电场 NS 向和 EW 向测值表现为较规则的线性极化关系。当地电场观测值中含有异

常电信号时,尤其是 NS、EW 两个测向接收到不均匀变化的场强时,会出现非极化现象。环境干扰与地震异常相比,极化系数要小得多,非极化程度更明显,甚至极化方向出现反向变化。

(2) 通过对平凉台 2008—2017 年的地电场观测资料逐天进行计算,结果显示平凉台地电场线性极化正常背景特征为:极化方向变化范围在 $N(66.7 \pm 6)^{\circ}E$ 以内,极化系数在 0.7~1.0 之间,垂直极化

方向上的投影值波动范围为 $(-0.53 \sim 2.61)$ mV/km,若超出该背景变化范围则认为是非极化异常。

(3) 通过计算和统计得到平凉地电场非极化异常对中强地震有较好的映震能力,非极化异常表现为:从震前非极化到震后恢复极化的一个过程,非极化持续时间一般在 $4 \sim 15$ 天,多出现在震前5天到1个月。该异常变化特征可以为该台周围发生中强地震短临预测提供参考。

(4) 本文涉及的数据处理和计算方法包括:常规处理、周期计算、极化方向、极化系数、垂直极化方向上的投影,应用于地电场数据跟踪分析是有效可行的。

参考文献(References)

- [1] 席继楼,赵家骝,王燕琼,等.地电场观测技术研究[J].地震,2002,22(2):67-73.
XI Jilou, ZHAO Jialiu, WANG Yanqong, et al. Research on Observational Technology of the Geoelectric Field[J]. Journal of Earthquake, 2002, 22(2): 67-73.
- [2] 阮爱国.国内外大地电场观测及其地震预报研究综述[J].高原地震,1995,7(3):26-30.
RUAN Aiguo. A Summarization of the Geoelectric Field Observation and Earthquake Prediction at Internal and Abroad[J]. Plateau Earthquake Research, 1995, 7(3): 26-30.
- [3] 叶青,杜学彬,周克昌,等.大地电场变化的频谱特征[J].地震学报,2007,29(4):382-390,448.
YE Qing, DU Xuebin, ZHOU Kechang, et al. Spectrum Characteristics of Geoelectric Field Variation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(4): 382-390, 448.
- [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] 章鑫,杜学彬,王丽,等.南北地震带大地电流分布与地震活动关系探讨[J].地学前缘,2017,24(2):202-211.
ZHANG Xin, DU Xuebin, WANG Li, et al. The Spatial Distribution of Telluric Currents and Its Relationship with Earthquake Activities in North-South Seismic Belt[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 202-211.
- [6] 王倩,韩小宾.河北昌黎台地电场数据与固体潮的初步研究[J].地震工程学报,2017,39(增刊1):117-120.
WANG Qian, HAN Xiaobin. Preliminary Study of Geoelectric Field Data and Earth Tide at Changli Station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(Suppl1): 117-120.

- [7] 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.
- [8] YE Q, FAN Y, DU Xuebin, et al. Diurnal Characteristics of Geoelectric Fields and Their Changes Associated with the Alxa Zuoqi $M_{\text{s}}5.8$ Earthquake on 15 April 2015 (Inner Mongolia) [J]. Earthquake Science, 2018, 31(1): 35-43.
- [9] 田山,王建国,徐学恭,等.大地电场观测地震前兆异常提取技术研究[J].地震学报,2009,31(4):424-431.
TIAN Shan, WANG Jianguo, XU Xuegong, et al. Research on the Technique of Extracting Seismic Precursory Anomaly from Telluric Electric Field Observation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2009, 31(4): 424-431.
- [10] 张学民,卢军.腾冲台强震前地电场线性极化特征[J].地震,2007,27(2):89-98.
ZHANG Xuemin, LU Jun. Linear Polarization Feature of Geoelectric Field before Strong Earthquakes at Tengchong Station[J]. Earthquake, 2007, 27(2): 89-98.
- [11] 杨学慧,蒋薇,孙维怀.弥渡台地电场震前线性极化异常分析[J].华北地震科学,2015,33(2):41-47.
YANG Xuehui, JIANG Wei, SUN Weihuai. Analysis on Linear Polarization Pre-earthquake Anomalies of Geoelectric Field at Midu Seismic Station [J]. North China Earthquake Sciences, 2015, 33(2): 41-47.
- [12] 范莹莹,安张辉,陈军营,等.岷县漳县 $M_{\text{s}}6.6$ 地震前平凉台地电场变化[J].地震工程学报,2013,35(4):827-834.
FAN Yingying, AN Zhanghui, CHEN Junying, et al. The Variation of Geoelectrical Field at Pingliang Station, Gansu Province, before the Minxian—Zhangxian $M_{\text{s}}6.6$ Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(4): 827-834.
- [13] 张远富,赵斐,李旭升,等.甘肃平凉地电场观测资料分析[J].内陆地震,2018,32(1):24-32.
ZHANG Yuanfu, ZHAO Fei, LI Xusheng, et al. Observation Data Analysis on Geo-electric Field on Gansu Pingliang[J]. Inland Earthquake, 2018, 32(1): 24-32.
- [14] 汪忠德.中国大陆自然电场的前兆机理与特征[J].西北地震学报,2008,30(4):360-365.
WANG Zhongde. Possible Precursor Mechanisms and Characteristics of Natural Geoelectrical Field before Earthquakes in Chinese Mainland [J]. Northwestern Seismological Journal, 2008, 30(4): 360-365.
- [15] 马钦忠.与2008年汶川 $M_{\text{s}}8.0$ 地震有关的成都台地电场异常信号[J].地震学报,2018,40(3):351-363.
MA Qinzong. Abnormal Signals of Geoelectric Field Related to Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ Earthquake Recorded at the Chengdu Station[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, 40(3): 351-363.

的应用[J].中国地震,2007,23(2):204-210.

YAN Rui, HUANG Fuqiong, CHEN Yong. Application of Wavelet Decomposition to Remove Barometric and Tidal Response in Borehole Water Level[J].Earthquake Research in China,2007,23(2):204-210.

[27] 曹玲玲,高安泰.气温气压与断层气氢浓度短期变化的相关性分析[J].地震学报,2014,36(4):719-729.

CAO Lingling, GAO Antai. Correlativity between Short-term Change of Fault Gas Radon Concentration and Air Temperature & Atmospheric Pressure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2014,36(4):719-729.

[28] 常秋君,何跟巧,郭玉英,等.断层气定点观测主要影响因素的研究[J].西北地震学报,1993,15(4):82-89.

CHANG Qiujun, HE Genqiao, GUO Yuying, et al. Study of Main Influences on Fixed-point Observation of Fault Gases [J].Northwestern Seismological Journal,1993,15(4):82-89.

[29] WOITH H, WANG R J, MAIWALD U, et al. On the Origin of Geochemical Anomalies in Groundwaters Induced by the Adana 1998 Earthquake [J]. Chemical Geology, 2013, 339: 177-186.

[30] CLAEISSON L, SKELTON A, GRAHAM C, et al. Hydrogeochemical Changes before and after a Major Earthquake [J]. Geology, 2004, 32(8):641.

[31] THOMAS D. Geochemical Precursors to Seismic Activity [J]. Pure and Applied Geophysics, 1988, 126(2-4):241-266.

[32] CLAEISSON L, SKELTON A, GRAHAM C, et al. The Time-scale and Mechanisms of Fault Sealing and Water-rock Interaction after an Earthquake [J]. Geofluids, 2007, 7(4):427-440.

的应用[J].中国地震,2007,23(2):204-210.

YAN Rui, HUANG Fuqiong, CHEN Yong. Application of Wavelet Decomposition to Remove Barometric and Tidal Response in Borehole Water Level[J].Earthquake Research in China,2007,23(2):204-210.

[27] 曹玲玲,高安泰.气温气压与断层气氢浓度短期变化的相关性分析[J].地震学报,2014,36(4):719-729.

CAO Lingling, GAO Antai. Correlativity between Short-term Change of Fault Gas Radon Concentration and Air Temperature & Atmospheric Pressure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2014,36(4):719-729.

[28] 常秋君,何跟巧,郭玉英,等.断层气定点观测主要影响因素的研究[J].西北地震学报,1993,15(4):82-89.

CHANG Qiujun, HE Genqiao, GUO Yuying, et al. Study of

(上接第 695 页)

[16] 孙君嵩,杜学彬.中国大陆地电暴时频特征[J].地震学报,2017,39(4):615-632,634.

SUN Junsong, DU Xuebin. The Time-frequency Characteristics of Geoelectric Storm in Chinese Mainland[J]. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(4):615-632, 634.

[17] 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(4):112-122.

[18] 杜秀英.基于 Pearson 相关分析的期刊引用关系研究[J].科技文献信息管理,2012,26(2):18-23.

DU Xiuying. A Study of Journal Citation based on Pearson Correlation Analysis[J]. Documentation & Information Management for Science and Technology, 2012, 26(2):18-23.

[19] 阮爱国,赵和云.提取地震地电场异常的垂直极化方向投影法[J].地震学报,2000,22(2):171-175,218.

RUAN Aiguo, ZHAO Heyun. Projection Method of Vertical Polarization Direction for Extracting the Anomalies of Seismic Geoelectric Field[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(2): 171-175, 218.