

辛建村, 谭大诚. 2017. 地电场多测向日变波形相位关联特征. 地震学报, 39(4): 604–614. doi:10.11939/jass.2017.04.014.

Xin J C, Tan D C. 2017. Phase correlation features of geoelectric field diurnal waveforms in multi-orientation. *Acta Seismologica Sinica*, 39(4): 604–614. doi:10.11939/jass.2017.04.014.

地电场多测向日变波形 相位关联特征^{*}

辛建村¹⁾ 谭大诚^{1,2),†}

1) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

2) 中国兰州 730000 兰州地球物理国家野外科学观测研究站

摘要 本文以电磁环境、装置系统、日变波形均具有代表性的海安、平凉、瓜州等 7 个台站为对象, 基于大地电场潮汐机理和裂隙水(电荷)渗流(移动)模型, 应用快速傅里叶变换和矢量分析方法, 研究这 7 个台站在 2009—2015 年多个时段、多个测向的地电场日变波形的相位关系及影响因素. 结果显示: 多方位地电场观测的日变波形之间具有同相或反相的相位关联特征; 当观测地电场的电极与仪器的连接方式确定后, 不同测向地电场日变波形的相位关联即由场地岩体裂隙优势方位所决定, 且这种相位关联特征具有相对稳定性.

关键词 地电场 日变波形 多测向 相位关系 裂隙优势方位

doi:10.11939/jass.2017.04.014

中图分类号: P315.72⁺2

文献标志码: A

Phase correlation features of geoelectric field diurnal waveforms in multi-orientation

Xin Jiancun¹⁾ Tan Dacheng^{1,2),†}

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou 730000, China

Abstract: In general, recognizable diurnal variation waveforms appear at 70 percent of the more than one hundred geoelectric field stations in Chinese mainland. In this paper, we discussed seven stations including Hai'an, Pingliang, Guazhou, which are representatively characterized by the electromagnetic environment, device system and the diurnal waveforms. Based on the tidal mechanism and the model of rock crack water seepage or the electric charges movement in crack water, and with the application of fast Fourier transform algorithm and vector analysis methods, we studied the phase correlation and influence factors of diurnal waveforms of the seven stations in multiple periods and multi-orientation during 2009—2015, and received the following conclusions:

* 基金项目 中国地震局监测预报司 2017 年专项任务(2017020401)、国家自然科学基金(41374080)和甘肃省强震跟踪项目(2014007-2)共同资助.

收稿日期 2016-07-07 收到初稿, 2017-04-10 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: tandc@gsdzj.gov.cn



geoelectric field diurnal waveforms observed in each orientation always show the same or opposite phase correlation; the dominant orientation of rock crack will decide phase correlations among geoelectric field diurnal waveforms observed from multi-orientation when the connection mode between electrodes and the instrument is determined, and the correlations are relatively steady.

Key words: geoelectric field; diurnal waveform; multi-orientation; phase correlation; crack dominant orientation

引言

自然电场和大地电场的概念早在 20 世纪 40 年代已被提出. 1984 年, Varotsos, Alexopoulos 和 Nomicos 提出使用从地电场观测资料中获取的地震电信号 (seismic electric signals, 简称为 SES) 预报地震的方法 (Varotsos, Alexopoulos, 1984a, b), 即 VAN 法, 该方法的原理主要应用基于地球内部的自然电场 (马钦忠等, 2004; 马钦忠, 2008). 目前, 大地电场在大地电磁测深 (magnetotelluric sounding, 简称为 MT) 中应用较多, 主要用于探测地球内部的电性结构 (陈小斌, 赵国泽, 2009; 赵国泽等, 2009; 汤吉等, 2010; 王书明等, 2013).

地电场和地磁场是地球电磁学的重要组成部分, 两者均属于地球基本物理场. 地电场的观测数据包含自然电场、大地电场和干扰成分, 其中, 大地电场是由地球外部的各种电流体系与地球介质相互作用而产生的分布于地表的感应电场 (孙正江, 王华俊, 1984; 钱家栋等, 1985), 场源主要包括电离层、月球和太阳的潮汐力、太阳风等, 具有典型的全球性或区域性日变特征 (谭大诚等, 2010). 通常, 中国大陆 100 余个地电场台站中有三分之二会出现可辨识的日变波形. 许多研究人员在大地电场日变化的波形特征 (谭大诚等, 2010)、频谱特征 (黄清华, 刘涛, 2006; 叶青等, 2007; 谭大诚等, 2011, 2013)、形成机理 (谭大诚等, 2010)、影响因素 (谭大诚等, 2011) 及地电场震前异常现象 (毛桐恩等, 1999; 张学民等, 2007; 安张辉等, 2010; 范莹莹等, 2010; 谭大诚等, 2010, 2012; 刘君等, 2011) 等方面进行了广泛而深入的研究, 并取得了很大进展. 基于地电场的矢量性和 VAN 法原理, 地电场观测通常采取多方位、多极距方式, 对地电场的分析基本集中在某一方位或同方位长、短极距之间, 很少对不同方位之间的地电场关联现象开展研究.

地电场观测装置布设于地表, 采取多方位观测的方式获取装置的地表平面矢量特征. 作者在最近的研究中发现, 多方位观测系统的两个正交测向之间, 例如 NS 测向与 EW 测向或 NW 测向与 NE 测向之间, 地电场日变波形的相位关联性在不同台站间的表现不同, 有的呈现同相位变化, 有的呈现反相位变化, 推测这种相位关联性的差别可能与局部结构或场源条件的差异有关. 为了探讨产生此类差异的原理, 本文给出几个典型台站观测到的不同的日变波形, 根据观测结果拟对场源条件的差异性进行分析, 并进一步解析其在地电场研究中的意义.

1 地电场观测装置及日变波形特征

1.1 中国大陆地电场观测装置

不同国家地电场的观测装置虽然在设计上有所差异, 但其原理基本均依据 VAN 法.

中国大陆地电场观测基本采用定点、多方位、多极距和水平观测等方式,测量频段为 0—0.005 Hz,采样率为 1 次/分钟(席继楼等,2002). 目前通常采用双等腰三角形的布极方式(图 1a),在 NS, EW 和 NW(NE)等 3 个方位进行观测.

地震台站建设的相关规范(中国地震局,2006)中规定:地电场正方向为由 N 至 S、由 E 至 W,斜测向正方向为由 N 至 E(W). 因此,对于图 1a 中的布极系统,电极与仪器的连接方式如图 1a, b 所示,其中蓝线、红线和绿线分别表示 NS, EW 和 NW(NE)测向电极与仪器的连接线,布极系统的正方向如图 1c 中箭头所示.

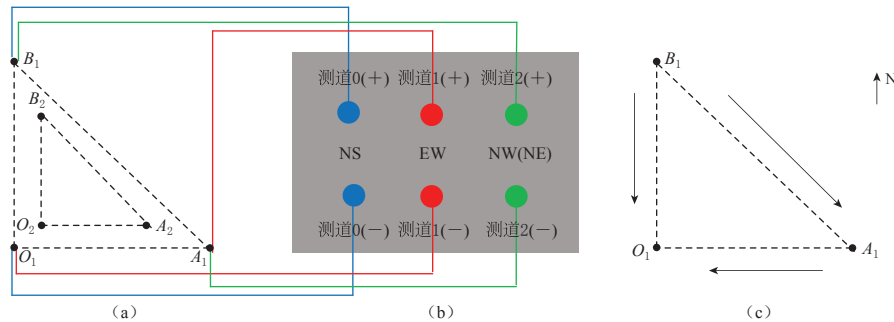


图 1 中国大陆地电场观测装置及连接方式

(a) 双等腰三角形布极系统; (b) 电极与仪器连接方式; (c) 地电场正方向(箭头所指方向)示意图

Fig. 1 Observation device of geoelectric field used in Chinese mainland and its connection mode

(a) Double “isosceles triangle” electrodes layout; (b) The connection mode between electrodes and instrument; (c) Positive direction (the arrow pointing direction) for geoelectric field

1.2 地电场多测向日变波形的相位关系特征

图 2a, b 给出了 2014 年 5 月 17—19 日江苏省海安台和甘肃省古丰台在 NS 测向观测到的地电场日变波形图,图 2c, d 分别为两台站在该时段的日变波形叠加曲线图. 可以看出,两个台站地电场波形的日变特征存在差异,海安台的日变波形可持续全天(图 2a),而古丰台的日变波形仅出现在午前和午后(图 2b),两者的日变波形分属谭大诚等(2010, 2011)提到的地电场潮汐波(tidal geoelectric field, 简称为 TGF)中的 TGF-A 和 TGF-B 波形.

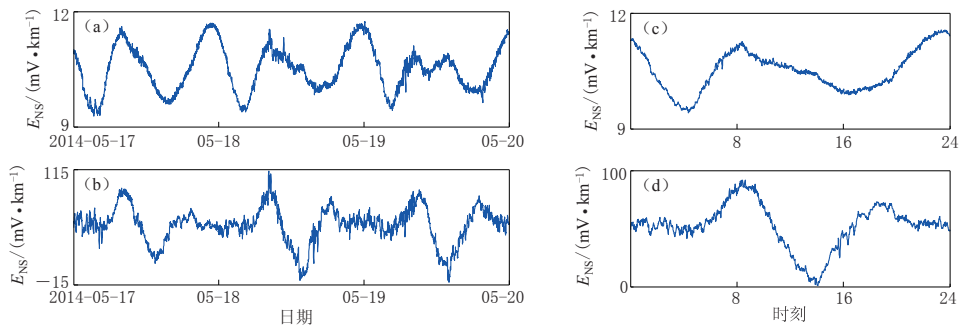


图 2 江苏海安台(a, c)和甘肃古丰台(b, d)NS 测向地电场日变波形及其叠加图

Fig. 2 Geoelectric field waveforms in NS orientation and the overlay maps of Hai'an station in Jiangsu Province (a, c) and Gufeng station in Gansu Province (b, d)

图 3 所示 4 幅图分别为 2015 年 4 月 6—8 日瓜州、高邮、银川和陵阳台在 NS, EW 和 NE 等 3 个不同测向观测到的地电场日变曲线, 其中甘肃瓜州台(图 3a)在 3 个测向观测到的地电场日变波形均为 TGF-B 型, 且波形的变化形态基本一致, 各测向均都在同一时段出现波峰或波谷, 说明这 3 个测向观测到的地电场日变波形的相位相同; 江苏高邮台(图 3b)在 3 个测向观测到的地电场日变波形均为 TGF-A 型, 且该台 3 个测向观测到的地电场日变波形的相位也相同; 宁夏银川台(图 3c)在 3 个测向的地电场日变波形均为 TGF-B 型, 其中 NS 和 NE 测向观测到的波形的相位相同, 且在同一时段出现波峰或波谷, 而 EW 测向观测到的日变波形出现波谷或波峰的时段与前两者相反, 说明 EW 测向与 NS 和 NE 测向的地电场日变波形的相位相反; 山东陵阳台(图 3d)在 3 个测向观测到的地电场日变波形均为 TGF-A 型, 且 EW 和 NE 测向观测到的地电场日变波形的相位相同, 而 NS 测向与这两个测向观测到的波形的相位相反。

表 1 为 2015 年 1—10 月上述 4 个台站在 NS 和 EW 测向观测到的地电场日变波形相

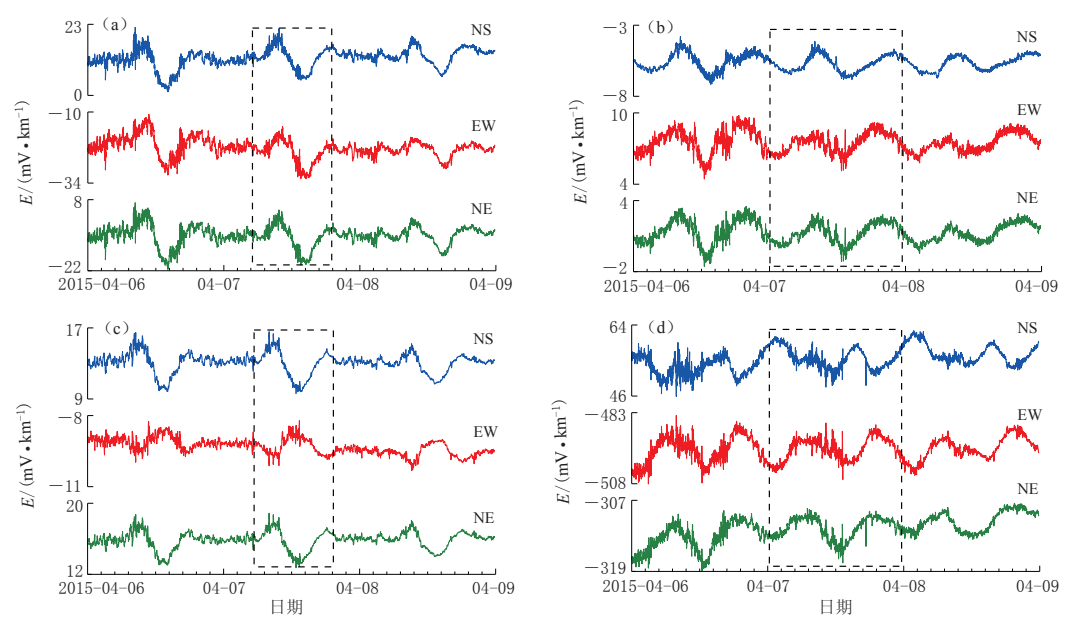


图 3 2015 年 4 月 6—8 日地电场日变波形相位对比图
(a) 瓜州台; (b) 高邮台; (c) 银川台; (d) 陵阳台

Fig. 3 Phase contrast of geoelectric field diurnal waveforms in April 6–8, 2015
(a) Guazhou station; (b) Gaoyou station; (c) Yinchuan station; (d) Lingyang station

表 1 2015 年 1—10 月 4 个台站 NS 和 EW 测向观测到的地电场日变波形相位关系的稳定性统计

Table 1 Statistics on phase correlation stability of geoelectric field diurnal waveforms in NS and EW orientations at the four stations from January to October of 2015

台站	日变波形 类型	日变波形相位关系									
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
瓜州	TGF-B	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
高邮	TGF-A	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
银川	TGF-B	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
陵阳	TGF-A	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

注：“+”表示相位相同，“—”表示相位相反。

位关系的逐月统计结果. 可以看出, 同一场地在 NS 和 EW 测向观测到的地电场日变波形之间只存在同相或反相的相位关系, 而且这种相位关系具有相对稳定性.

2 多测向地电场日变波形相位关系机理分析

2.1 正交测向(NS 和 EW)地电场日变波形相位关系分析

为了解释不同台站正交测向地电场日变波形的相位关系, 假设台站测区存在一个局部的与电荷流动方向有关的定向性场源. 在潮汐力作用下裂隙水沿优势方位渗流, 或在太阳静日变化(solar quiet variation, 简称为 Sq)电流作用下裂隙水中的电荷沿优势方位移动, 在此过程中负电荷由于被大多数岩石颗粒吸附致使正负电荷分离形成与渗流或正电荷移动方向相反的过滤电场, 用 E_T 表示. 图 4 为正交测向地电场日变波形的相位关系原理示意图, 地表设置的观测装置及正负方向规定同 1.1 节. 基于矢量分解方法, NS 和 EW 测向观测到的地电场日变波形的相位关系机理为: 当场源电荷流动的优势方位为 NW 向时(图 4a), 沿此方位形成的 E_T 在 NS 和 EW 测向的分量分别为 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$, 其中 $E_{T(NS)}$ 的方向与规定的正方向相同, $E_{T(EW)}$ 的方向与规定的正方向相反, 且因二者为同一矢量 E_T 在不同方向上的分量, 因此随着 E_T 的变化其变化形态相反, 即其波形的相位相反; 当场源电荷流动的优势方位为 NE 向时(图 4b), 沿此方位形成的 E_T 在 NS 和 EW 测向的分量分别为 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$, 其方向均与规定的正方向相同, 且因二者为同一矢量 E_T 在不同方向上的分量, 因此随着 E_T 的变化其变化形态相同, 即其波形的相位相同; 当场源电荷流动的优势方位为 N 向时(图 4c), 沿此方位形成的 E_T 在 NS 测向产生正电场, 而在 EW 测向日变波形可能小或不稳定, 因此这两个方位无明确的相位关联; 当场源电荷流动的优势方位为 E 向时(图 4d), 沿此方位形成的 E_T 在 EW 测向产生正电场, 而在 NS 测向日变波形可能小或不稳定, NS 与 EW 测向亦无明确的相位关联.

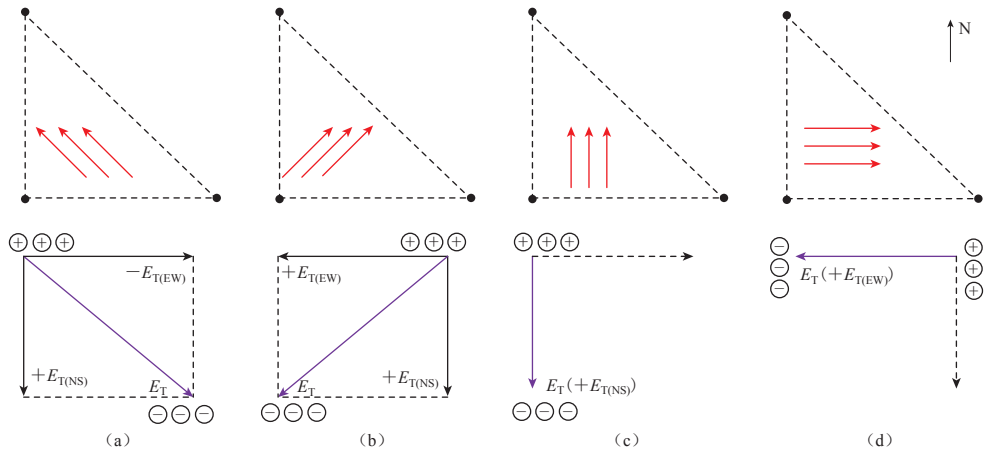


图 4 不同电荷流动优势方向下正交测向(NS 和 EW)地电场日变波形的相位关系原理示意图(红色箭头表示裂隙优势方位, 下同)

(a) NW 向; (b) NE 向; (c) N 向; (d) E 向

Fig. 4 Phase correlation principle diagram of orthogonal (NS and EW) geoelectric field diurnal waveforms in different dominant orientations of charge movement (red arrows represent dominant orientation of rock crack, the same below)
(a) NW direction; (b) NE direction; (c) N direction; (d) E direction

2.2 斜测向(NW)与正交测向(NS 和 EW)地电场日变波形相位关系分析

当场源电荷流动的优势方位为 NW 向时, E_T 在 NW 测向的分量 $E_{T(NW)}$ 的方向与规定的正方向相同, 因此 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(NS)}$ 的相位相同, 与 $E_{T(EW)}$ 的相位相反(图 5a). 当场源电荷流动的优势方位为 NE 向时(图 5b, c), E_T 在 NW 测向的分量 $E_{T(NW)}$ 的方向与裂隙优势方位角 α 的大小有关: 当 $\alpha < N45^\circ E$ 时, $E_{T(NW)}$ 的方向与规定的正方向相同, 因此 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$ 的相位相同(图 5b); 当 $\alpha > N45^\circ E$ 时, $E_{T(NW)}$ 的方向与规定的正方向相反, 因此 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$ 的相位相反(图 5c). 当场源电荷流动的优势方位为 N 向时, E_T 在 NW 测向的分量 $E_{T(NW)}$ 的方向与规定的正方向相同, 因此 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(NS)}$ 的相位相同(图 5d). 当场源电荷流动的优势方位为 E 向时, E_T 在 NW 测向的分量 $E_{T(NW)}$ 的方向与规定的正方向相反, 因此 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(EW)}$ 的相位相反(图 5e).

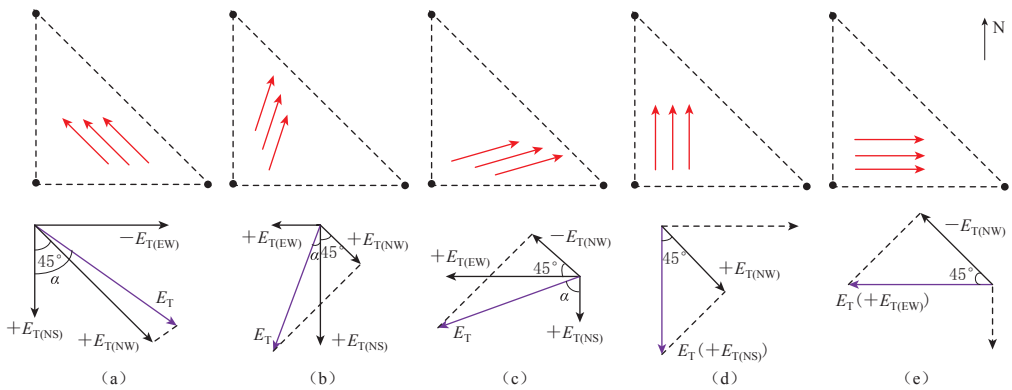


图 5 不同电荷流动优势方向下斜测向(NW)与正交测向(NS 和 EW)地电场日变波形相位关系原理示意图

(a) NW 向; (b) NE 向($\alpha < N45^\circ E$); (c) NE 向($\alpha > N45^\circ E$); (d) N 向; (e) E 向

Fig. 5 Principle diagram of phase correlation between oblique (NW) and orthogonal (NS and EW) geoelectric field diurnal waveforms in different dominant orientations of charge movement

(a) NW direction; (b) NE direction ($\alpha < N45^\circ E$); (c) NE direction ($\alpha > N45^\circ E$); (d) N direction; (e) E direction

2.3 关于场源电荷流动机制的猜想

场源电荷的来源是一个值得认真探讨的问题. 谭大诚等(2010, 2011, 2013)曾针对地电场日变波形的特征和机理等问题作过系统的研究, 指出裂隙水中离子的周期性流动(日变化)引起的正负电荷的分离及 S_q 电流体系的感应作用均有可能成为“场源”, 而场源电荷流动的指向可能因观测场地而异, 因此导致了正交测向地电场日变波形的相位差异, 即同相或反向.

地电场日变化是大地电场相对稳定的主体, 其形成机理的物理模型如图 6 所示. 图 6a 为裂隙优势排列方位, 沿此方位形成的电场 E_T 具有日周期性(图 6b)(徐文耀, 1992; 谭大诚等, 2010). 由于电场是矢量场, 因此可在 NS, EW 和 NW 方位分别产生分量 $E_{T(NS)}$, $E_{T(EW)}$ 和 $E_{T(NW)}$ (图 6c), 应用各分量潮汐谐波的前 10 阶振幅和, 可逐日计算出 E_T 的方位角, 即裂隙优势方位角 α

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

式中， α 为正表示 NE 方向，为负表示 NW 方向(谭大诚等，2014)， $A_{(NW)i}$ 和 $A_{(NS)i}$ 分别为 NW 和 NS 测向第 i 阶潮汐谐波的振幅。

裂隙水的渗流或裂隙水中电荷的移动是以日为周期进行的。本文仅分析了单一方向(一段时间)下裂隙水的渗流或电荷移动的情况(图 4, 5)，当渗流方向与电荷流动的方向相反时， E_T 及各分量的方向均发生反转，各测向观测到的日变波形之间的相位关系保持不变。

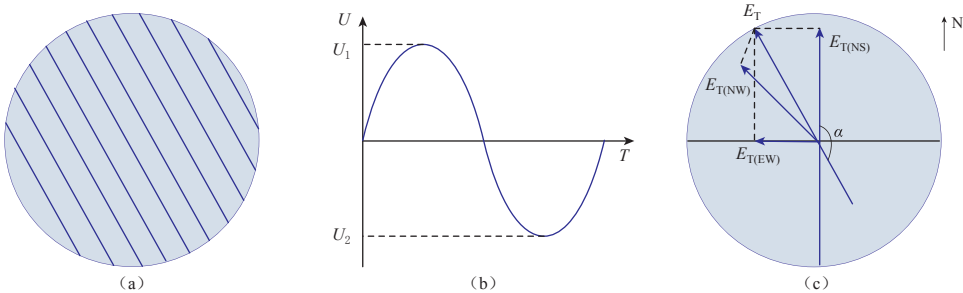


图 6 多测向地电场日变波形相位关系分析的物理模型

(a) 裂隙优势方位排列示意图；(b) 裂隙水(电荷)渗流(移动)的周期性；(c) 地电场 E_T 及其在各测向的分量
Fig. 6 Physical model of phase correlation analysis of multi-orientation geoelectric field diurnal waveforms
(a) Sketch of crack dominant orientation; (b) Periodicity of crack water seepage or electric charges movement;
(c) Geoelectric field E_T and its components in each orientation

2.4 场源电荷流动机制讨论

基于地电场日变波形的物理模型，2.3 节提出了多测向地电场日变波形相位关系的岩体裂隙水的电荷流动机制。下面以电磁环境、观测系统均较好的平凉地电场台站为例，按照上述机制进行分析。甘肃平凉地电场台站的电极布设如图 7a 所示，该台站在 NS, EW 和 NW 测向观测到的日变波形均为 TGF-B 波。选取该台 2009 年 7 月 7—9 日的观测数据，根据式(1)，利用 EW 和 NW 测向的数据计算得到该台站 3 日的场源电荷流动优势方位角 α 分别为 N67.25°E, N66.66°E, N66.41°E。依据 2.1 和 2.2 节中相位关系的理论，可推断出该台站地电场分量 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$ 为同相关联，而 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$ 为反相关联。

图 7b 为平凉台 3 日内地电场日变波形的分钟值观测曲线，可以看出， $E_{T(NS)}$ 与 $E_{T(EW)}$ 为同相关联，而 $E_{T(NW)}$ 与 $E_{T(NS)}$ 和 $E_{T(EW)}$ 为反相关联，与图 5c 分析结果相吻合。

对平凉台 3 日内的观测数据进行相关性分析，结果显示，任意两个测向之间电场分量的相关系数 γ 的绝对值均为 0.99。按照地电场矢量合成与分解关系，由图 7c 得到

$$E'_T = \frac{E'_{T(EW)}}{\sin \alpha} = \frac{E'_{T(NW)}}{\cos(135^\circ - \alpha)} = \frac{E'_{T(NS)}}{\cos \alpha}, \tag{2}$$

式中， E'_T 为通过矢量合成得到的地电场前 10 阶谐波振幅和， $E'_{T(NW)}$ ， $E'_{T(NS)}$ 和 $E'_{T(EW)}$ 分别为各测向当天观测数据的前 10 阶谐波振幅和(谭大诚等，2014)。

选取 2009 年 7 月 7 日的分钟值观测数据，计算 E'_T ， $E'_{T(NW)}$ ， $E'_{T(NS)}$ ， $E'_{T(EW)}$ 及各测向之间的相关系数 γ ，结果如表 2 所示。可见：① 任意两个方位间的相关系数的绝对值均接近

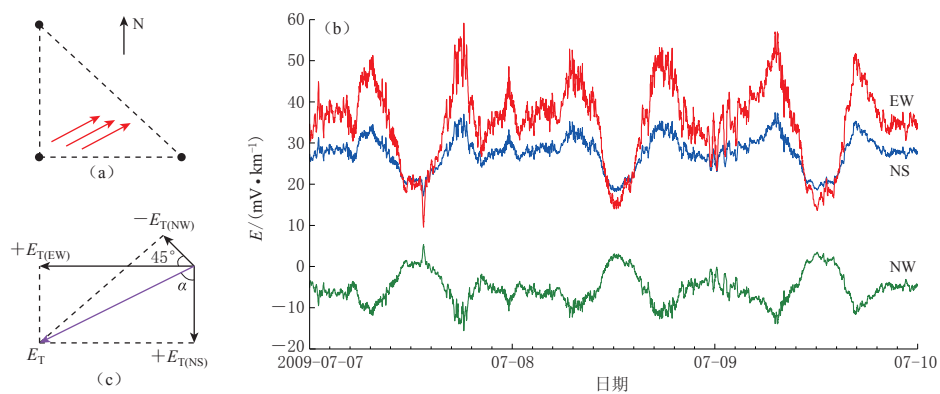


图 7 平凉台各测向日电场日变波形相位关系分析图
(a) 布极方式及裂隙优势方位; (b) NS, EW 和 NW 测向的地电场日变波形; (c) E_T 与各分量的矢量关系
Fig. 7 Analysis of phase correlation of geoelectric field diurnal waveforms in different orientations at Pingliang station

(a) Layout of electrodes and dominant crack orientation; (b) Geoelectric field diurnal waveforms in NS, EW, and NW orientations; (c) Vector relations between E_T and each component

表 2 2009 年 7 月 7 日平凉台 3 个测向潮汐谐波振幅和的矢量关系
Table 2 Vector relations of the sum of tidal harmonic amplitudes in the three orientations for Pingliang station on July 7, 2009

测向	日变波形	α	E'_T 分量 / $(\text{mV} \cdot \text{km}^{-1})$	E'_T / $(\text{mV} \cdot \text{km}^{-1})$	$\gamma_{EW/NW}$	$\gamma_{EW/NS}$	$\gamma_{NW/NS}$
EW	TGF-B		13.16	14.27			
NW	TGF-B	N67.25°E	5.40	14.26	-0.99	0.99	-0.99
NS	TGF-B		5.67	14.66			

于 1.0; ② 按照式(2), 由 EW, NW 和 NS 各测向观测值的前 10 阶谐波振幅和计算得到的 E'_T 基本相同, 3 个方位之间的地电场矢量合成结果吻合度高, 反映了该场地场源电荷流动的优势方位明显, 各测向观测到的地电场日变波形主要受裂隙水中电荷以日为周期移动的影响(谭大诚等, 2011), 该裂隙走向约为 N67.25°E.

不同的电极与仪器连接方式会对各测向日电场日变波形之间的相位关系产生影响. 以平凉台为试验场地, 工作人员于 2010 年 6 月 6 日 9 时对该台 NW 测向长、短极距的电极正负极性进行了调整, 即反向连接. 图 8 给出了 2010 年 6 月 5—7 日连接方式改变前后, 平凉台各测向的地电场日变波形. 可以看出: 6 月 5 日, 即对 NW 测向电极正负极性调整前, NW 与 NS 和 EW 测向的地电场日变波形相位相反; 自

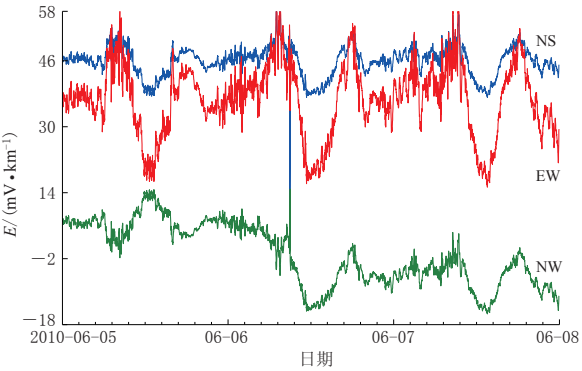


图 8 平凉台各测向日电场日变波形
Fig. 8 Geoelectric field diurnal waveforms in each orientation at Pingliang station

2010 年 6 月 5—7 日连接方式改变前后, 平凉台各测向的地电场日变波形. 可以看出: 6 月 5 日, 即对 NW 测向电极正负极性调整前, NW 与 NS 和 EW 测向的地电场日变波形相位相反; 自

6 日调整后, NW 与 NS 和 EW 测向的地电场日变波形的相位相同. 这说明若电极正负极与仪器的连接方式发生改变, 则各测向间的地电场日变波形的相位关系也会随之改变.

3 讨论与结论

近年, 关于地电场日变波形在不同测向之间的相位关系及其机理、影响因素等引起了观测和分析人员的关注. 然而, 对这个问题一直未能开展系统的研究. 本文依据地电场潮汐机理、裂隙水(电荷)渗流(移动)模型对这一现象予以研究, 初步获得以下两点结论:

1) 在确认台站装置系统正确的情况下, 一个场地的多方位观测系统中两个正交测向的地电场日变波形可呈现相同或相反的相位关系, 这种相位关系在不同台站有所不同, 其原因在于局部结构或场源条件存在差异.

2) 鉴于不同方位地电场日变波形相位关系的特点, 提出了在测区下方可能存在定向流动电荷的设想, 并对其进行了解释. 在观测场地的结构方面, 介质裂隙结构的定向排列为电荷在裂隙水中的流动提供了通道, 电流方向以日为周期的变化可能是由固体潮汐或电离层 Sq 电流体系的感应所造成.

本文的研究方法及结论有待于根据测区下方的裂隙分布优势方位的宏观调查结果进行验证, 目前这方面的工作几乎还是空白, 亟需加强. 上述结论若能被实际考察资料所证实, 则可为地电场日变化研究与台站(或测区)下方介质的探测提供一种新方法.

中国地震局地震预测研究所钱家栋研究员、中国地震局兰州地震研究所武震副研究员和章鑫对本研究提出了建设性的意见, 甘肃省地震局、江苏省地震局和山东省地震局及宁夏回族自治区地震局提供了地电场数据, 审稿专家对本文提出了宝贵的意见和建议, 作者在此一并表示衷心的感谢!

参 考 文 献

- 安张辉, 元丽华, 李宁, 范莹莹, 谭大诚, 陈军营, 郑国磊. 2010. HHT 方法在地电场数据处理中的应用[J]. 地球物理学进展, **25**(2): 525–532.
- An Z H, Yuan L H, Li N, Fan Y Y, Tan D C, Chen J Y, Zheng G L. 2010. Discussion on the application of HHT method to geoelectric field data processing[J]. *Progress in Geophysics*, **25**(2): 525–532 (in Chinese).
- 陈小斌, 赵国泽. 2009. 自动构建大地电磁二维反演的测点中心网格[J]. 地球物理学报, **52**(6): 1564–1572.
- Chen X B, Zhao G Z. 2009. Automatic construction of a site-centered grid (SCG) for 2D magnetotelluric inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(6): 1564–1572 (in Chinese).
- 范莹莹, 杜学彬, Zlotnicki J, 谭大诚, 刘君, 安张辉, 陈军营, 郑国磊, 解滔. 2010. 汶川 $M_s 8.0$ 大震前的电磁现象[J]. 地球物理学报, **53**(12): 2887–2898.
- Fan Y Y, Du X B, Zlotnicki J, Tan D C, Liu J, An Z H, Chen J Y, Zheng G L, Xie T. 2010. The electromagnetic phenomena before the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(12): 2887–2898 (in Chinese).
- 黄清华, 刘涛. 2006. 新岛台地电场的潮汐响应与地震[J]. 地球物理学报, **49**(6): 1745–1754.
- Huang Q H, Liu T. 2006. Earthquakes and tide response of geoelectric potential field at the Niiijima station[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(6): 1745–1754 (in Chinese).
- 刘君, 杜学彬, Zlotnicki J, 范莹莹, 安张辉, 解滔, 郑国磊, 谭大诚, 陈军营. 2011. 几次大震前的地面和空间电磁场变化[J]. 地球物理学报, **54**(11): 2885–2897.
- Liu J, Du X B, Zlotnicki J, Fan Y Y, An Z H, Xie T, Zheng G L, Tan D C, Chen J Y. 2011. The changes of the ground

- and ionosphere electric/magnetic fields before several great earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(11): 2885–2897 (in Chinese).
- 马钦忠, 冯志生, 宋治平, 赵卫国. 2004. 崇明与南京台震前地电场变化异常分析[J]. *地震学报*, **26**(3): 304–312.
- Ma Q Z, Feng Z S, Song Z P, Zhao W G. 2004. Study on the variation characteristics of the geoelectric field preceding earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **26**(3): 304–312 (in Chinese).
- 马钦忠. 2008. 地电场多极距观测装置系统与文安 Ms5.1 地震前首都圈地电场异常研究[J]. *地震学报*, **30**(6): 615–625.
- Ma Q Z. 2008. Multi dipole observation system and study on the abnormal variation of the geoelectric field observed at Capital Network before the 2006 Wen'an, Hebei of China, Ms5.1 earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **30**(6): 615–625 (in Chinese).
- 毛桐恩, 席继楼, 王燕琼, 尹淑芝. 1999. 地震过程中的大地电场变化特征[J]. *地球物理学报*, **42**(4): 520–528.
- Mao T E, Xi J L, Wang Y Q, Yin S Z. 1999. The variation characteristics of the telluric field in the process of earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **42**(4): 520–528 (in Chinese).
- 钱家栋, 陈有发, 金安忠. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京: 地震出版社: 38–47.
- Qian J D, Chen Y F, Jin A Z. 1985. *The Application of Resistivity Method in Earthquake Prediction*[M]. Beijing: Seismological Press: 38–47 (in Chinese).
- 孙正江, 王华俊. 1984. 地电概论[M]. 北京: 地震出版社: 23–28.
- Sun Z J, Wang H J. 1984. *An Introduction to Geoelectricity*[M]. Beijing: Seismological Press: 23–28 (in Chinese).
- 谭大诚, 赵家骝, 席继楼, 杜学彬, 徐建明. 2010. 潮汐地电场特征及机理研究[J]. *地球物理学报*, **53**(3): 544–555.
- Tan D C, Zhao J L, Xi J L, Du X B, Xu J M. 2010. A study on feature and mechanism of the tidal geoelectrical field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(3): 544–555 (in Chinese).
- 谭大诚, 王兰炜, 赵家骝, 席继楼, 刘大鹏, 于华, 陈军营. 2011. 潮汐地电场谐波和各向波形的影响要素[J]. *地球物理学报*, **54**(7): 1842–1853.
- Tan D C, Wang L W, Zhao J L, Xi J L, Liu D P, Yu H, Chen J Y. 2011. Influence factors of harmonic waves and directional waveforms of tidal geoelectrical field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **54**(7): 1842–1853 (in Chinese).
- 谭大诚, 赵家骝, 席继楼, 刘大鹏, 安张辉. 2012. 青藏高原中强地震前的地电场变异及构成解析[J]. *地球物理学报*, **55**(3): 875–885.
- Tan D C, Zhao J L, Xi J L, Liu D P, An Z H. 2012. The variation of waveform and analysis of composition for the geoelectrical field before moderate or strong earthquakes in Qinghai-Tibetan Plateau regions[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(3): 875–885.
- 谭大诚, 席继楼, 张慧, 王兰炜, 范莹莹, 安海静. 2013. 地电场水文地质因素及裂隙水主体渗流方向逐日计算[J]. *地震学报*, **35**(1): 36–49.
- Tan D C, Xi J L, Zhang H, Wang L W, Fan Y Y, An H J. 2013. Hydrogeologic factors of geoelectric field and diurnal computation of preferred orientation of crack water seepage[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(1): 36–49 (in Chinese).
- 谭大诚, 赵家骝, 刘小凤, 范莹莹, 刘君, 陈军营. 2014. 自然电场的区域性变化特征[J]. *地球物理学报*, **57**(5): 1588–1598.
- Tan D C, Zhao J L, Liu X F, Fan Y Y, Liu J, Chen J Y. 2014. Features of regional variations of the spontaneous field[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(5): 1588–1598 (in Chinese).
- 汤吉, 詹艳, 王立凤, 董泽义, 赵国泽, 徐建郎. 2010. 汶川地震强余震的电磁同震效应[J]. *地球物理学报*, **53**(3): 526–534.
- Tang J, Zhan Y, Wang L F, Dong Z Y, Zhao G Z, Xu J L. 2010. Electromagnetic coseismic effect associated with after-shock of Wenchuan Ms8.0 earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **53**(3): 526–534 (in Chinese).
- 王书明, 李德山, 胡浩. 2013. 三维/三维构造下大地电磁相位张量数值模拟[J]. *地球物理学报*, **56**(5): 1745–1752.
- Wang S M, Li D S, Hu H. 2013. Numerical modeling of magnetotelluric phase tensor in the context of 3D/3D formation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(5): 1745–1752 (in Chinese).

- 席继楼, 赵家骝, 王燕琼, 王兰炜, 李艳东. 2002. 地电场观测技术研究[J]. 地震, **22**(2): 67-73.
- Xi J L, Zhao J L, Wang Y Q, Wang L W, Li Y D. 2002. Research on observational technology of the geoelectric field [J]. *Earthquake*, **22**(2): 67-73 (in Chinese).
- 徐文耀. 1992. S_q 发电机电流的逐日变化和 S_q 指数[J]. 地球物理学报, **35**(6): 676-684.
- Xu W Y. 1992. Day-to-day variability of the S_q dynamo currents and S_q index[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **35**(6): 676-684 (in Chinese).
- 叶青, 杜学彬, 周克昌, 李宁, 马占虎. 2007. 大地电场变化的频谱特征[J]. 地震学报, **29**(4): 382-390.
- Ye Q, Du X B, Zhou K C, Li N, Ma Z H. 2007. Spectrum characteristics of geoelectric field variation[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(4): 382-390 (in Chinese).
- 张学民, 翟彦忠, 郭学增, 郭建芳. 2007. 远震前的地电场潮汐波异常[J]. 地震学报, **29**(1): 48-58.
- Zhang X M, Zhai Y Z, Guo X Z, Guo J F. 2007. Tidal wave anomalies of geoelectrical field before remote earthquakes [J]. *Acta Seismologica Sinica*, **29**(1): 48-58 (in Chinese).
- 赵国泽, 陈小斌, 肖骑彬, 王立凤, 汤吉, 詹艳, 王继军, 张继红, Utada H, Uyeshima M. 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 级地震成因三“层次”分析: 基于深部电性结构[J]. 地球物理学报, **52**(2): 553-563.
- Zhao G Z, Chen X B, Xiao Q B, Wang L F, Tang J, Zhan Y, Wang J J, Zhang J H, Utada H, Uyeshima M. 2009. Generation mechanism of Wenchuan strong earthquake of $M_s 8.0$ inferred from EM measurements in three levels[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **52**(2): 553-563 (in Chinese).
- 中国地震局. 2006. DB/T 18.2—2006 地震台站建设规范, 地电台站, 第 2 部分: 地电场台站[S]. 北京: 地震出版社: 6-7.
- China Earthquake Administration. 2006. DB/T 18.2—2006 *Specification for the Construction of Seismic Station, Geoelectrical Station, Part 2: Geoelectrical Field Observatory*[S]. Beijing: Seismological Press: 6-7 (in Chinese).
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984a. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I[J]. *Tectonophysics*, **110**(1/2): 73-98.
- Varotsos P, Alexopoulos K. 1984b. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, II. Determination of epicenter and magnitude[J]. *Tectonophysics*, **110**(1/2): 99-125.