

崔腾发, 杜学彬, 叶青等. 中国大陆经纬链地电场日变化. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2358-2368, doi:10.6038/cjg20130722.
Cui T F, Du X B, Ye Q, et al. The diurnal variation of geo-electric field along the longitude and latitude chains in China mainland. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(7): 2358-2368, doi:10.6038/cjg20130722.

中国大陆经纬链地电场日变化

崔腾发¹, 杜学彬^{1,2*}, 叶青³, 陈军营^{1,2}, 王建军^{1,2},
安张辉^{1,2}, 范莹莹^{1,2}, 刘君^{1,2}

1 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 兰州 730000

2 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

3 中国地震台网中心, 北京 100045

摘 要 本文应用中国大陆两条经度链和两条纬度链上共 37 个地电场台站的观测数据, 研究了地电场日变化的时/频域特征, 结果认为, 绝大多数台站的日变化表现为两次起伏的半日波, 紧临午前午后出现; 按 FFT 振幅谱由大到小, 其主要周期成分依次为 12.4/12、8、24 h 等, 与潮汐调和分量周期一致; 纬度效应主要表现为沿经度链的日变化幅度与纬度高/低有关, 日变化相位差与当地时差吻合; Loyd 季节的 J 季节日变化幅度最大、E 季节其次、D 季节最小, 讨论了产生日变化主要周期成分的可能原因, 认为月日引潮力引起的地面涡旋电流强度变化和太阳风引起的空间电磁活动共同产生了地电日变化的半日波周期成分。

关键词 地电场, 日变化, 周期, FFT, 潮汐

doi:10.6038/cjg20130722

中图分类号 P318

收稿日期 2012-12-10, 2013-03-21 收修定稿

The diurnal variation of geo-electric field along the longitude and latitude chains in China mainland

CUI Teng-Fa¹, DU Xue-Bin^{1,2*}, YE Qing³, CHEN Jun-Ying^{1,2}, WANG Jian-Jun^{1,2},
AN Zhang-Hui^{1,2}, FAN Ying-Ying^{1,2}, LIU Jun^{1,2}

1 State Geophysics Observatory in Lanzhou, Lanzhou 730000, China

2 Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

3 China Earthquake Networks Center, Beijing, 100045, China

Abstract This paper has studied the time and frequency characteristics of the geo-electric field diurnal variation along the two longitude chains and the two latitude chains, using the data of the geo-electric field observed at the 37 stations along the chains. Accordingly, the following significant results are obtained; the variation appears mainly as semi-diurnal waves twice a day at most of the stations, approximately before and after the noon; according to the big to small order of the FFT amplitude spectrums, the main periods of the diurnal variation are 12.4 h/12 h, 8 h, 24 h, etc, which are in accordance with the periods of the tidal harmonic components; the latitude effect on diurnal variation is manifested by the amplitude changing with latitude along a longitude chain, and the longitude effect is shown as phase difference consistent with the local-time difference between the stations at the same latitude. Furthermore, the amplitude of the diurnal

基金项目 国家自然科学基金(41174059), 国家自然科学基金(40474027)资助.

作者简介 崔腾发, 男, 硕士生, 主要从事地震电磁学研究. E-mail: cuitengfa@sina.com

* **通讯作者** 杜学彬, 主要从事地震电磁学研究. E-mail: duxb@163.com

variation is related with the Loyd season, which reduces orderly in J-, E- and D-seasons. The possible reasons for the main periodic components of the diurnal variation have been discussed, as a result, it is believed that the variation of the ground eddy current intensity caused by lunisolar tidal forces and the space electromagnetic activity aroused by the solar wind jointly produce the semi-diurnal period components of the geo-electric diurnal variation.

Keywords Geoelectric field, Diurnal variation, Period, FFT, Tide

1 引言

地球电场(简称“地电场”)主要由固体地球外部的电流体系在地球内部感应产生的分布于地表的快变化电场和地下介质中的物理、化学作用引起的慢变化电场两部分组成.地电场观测在资源勘探、地质调查等方面应用广泛,利用固定台站观测地电场的主要目的之一是进行地震等灾害事件的监测预报和地球电磁环境研究.20 世纪初以来,国内外学者开展了固定台站的地电场观测和研究,对地电场时空变化的分布规律取得了重要认识^[1-8],吉什和鲁尼在总结长期观测资料的基础上绘制了第一幅全球涡旋电流场分布图^[1](1936 年世界时 18 h).地电场观测在震与火山等灾害事件监测预报实验中也得到广泛应用^[9-18].我国从“九五”后期开始了大空间范围、定点、连续、规范化的地电场观测^[19-20],截止 2011 年我国已建成由 100 多个台站组成的地电场观测台网,其中部分台站持续观测时间已超过 10 年以上.国内进行的地电场观测是目前国内外地球电磁学观测的一大特色,目前关于地电场在震监测预报实验中的研究工作较多,但关于地电场时空变化规律的研究甚至于国外都很薄弱.文献^[21-23]应用我国

部分地电场台站的观测数据研究了地电场日变化(以下简称“地电日变化”)的时频分布特征,但数据应用不具中国大陆大区域的特点,研究成果有限、且认识有所不同,对于认识地电日变化的时空分布规律来讲是不够的.鉴于我国地电场台网在某些区域密度高、数据积累丰富,本文在文献^[21-23]的研究基础上,应用中国大陆东部、西部、中低纬度、中纬度各两条经度链、纬度链的地电场台站观测数据,研究地电日变化的时空分布规律,期望能获得对中国大陆地电日变化的广域性、普遍性特点的进一步认识.

2 数据选取

我国地电场台站观测装置是水平布设 NS、EW 两个正交观测方向再加一个斜交方向,长、短极距共 6 个测道^[20],每测道采样率为 1 次/min,仪器分辨率为 $10 \mu\text{V}$,24 h 连续观测.为了研究地电场在中国大陆大空间区域的时、空变化规律,选取我国地电场台网中两条经度链、两条纬度链台站的观测数据.选取原则为:①台站分布范围尽量大,空间距离尽可能均匀;②尽可能选取经度链、纬度链上及近距离台站;③台站观测数据质量合格.如图 1 所示,沿 118°E 经线选 14 个台站组成经度链 a,由南向北台站依次

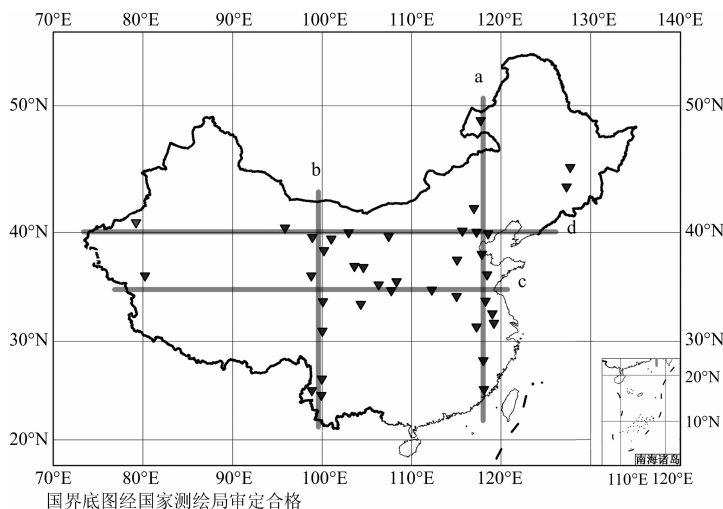


图 1 地电场观测台网中经纬链图示

Fig. 1 The longitudinal and latitudinal chains on geoelectric network

为:福建泉州、邵武,江苏海安、高邮,安徽嘉山,山东郯城、无棣,河北大柏舍、昌黎,北京通州,内蒙古宝昌,吉林榆树,黑龙江绥化、满洲里;沿 99°E 经线选 12 个台站组成经度链 b,由南向北依次为:云南腾冲、洱源,四川泸沽湖、甘孜,青海大武、都兰,甘肃寺滩、古浪、山丹、高台、嘉峪关,宁夏石嘴山;沿 40°N 纬线选 7 个台站组成纬度链 c,由西向东依次为:新疆乌什,甘肃瓜州、古浪、嘉峪关,山西大同,北京延庆、通州;沿 34°N 选 12 个台站组成链 d,由西向东依次为:新疆和田,青海都兰、大武,甘肃陇南、静宁,陕西周至、乾陵,河南洛阳、周口,山东郯城,江苏高邮、海安. 由于台站观测环境影响,某些近距离台站未入选.

近年来,随着我国地电场台网的建设 and 台网规范化运行,执行了严格的观测质量监控程序,整体上数据质量有所提高,所以选取资料的时段主要为 2010、2011 年. 个别台站受环境干扰,使用 2008 年以来其他年份的观测数据.

3 地电场日变化波形

3.1 波形变化

根据亥姆霍兹波茨坦中心(GFZ)公布的磁情指数,尽可能选取每月磁静日、且日期接近天数的观测数据. 数据处理采用时序迭加方法,突出有规律性的日变化周期、抑制不规则噪声. 时序迭加公式如下:

$$X(t) = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k X_n(t) \quad n = 1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

式(1)中 $X_n(t)$ 表示所选时间范围内第 n 天的地电场数据,每天的数据长度为 1440 个(分钟值采样), k 指第 k 天.

以经度链 a 上台站观测数据为主要研究对象. 图 2 是链 a 中 8 个地电场台站每个台 2010 年 2 月 3 个磁静日(或一般磁静日)的观测数据时序迭加曲线. 按纬度由低到高的顺序从上到下排列. 由图明显可见:地电日变化主要表现为两峰—两谷变化波形,其中低纬度的泉州、海安、高邮台以及中低纬度的郯城、无棣和中高纬度的绥化台日变化波形表现为两峰—两谷波形;满洲里台表面上是中午前后 1 峰—1 谷变化波形.

链 a 台站分布在 25.02°N—49.57°N 的纬度范围,由图 2 似乎可见,总体上台站纬度高,日变化峰—谷幅度 $|E_p|$ 偏小(如绥化台纬度最高,北分量 $|E_p|$ 是 0.6 mV/km,东分量 0.4 mV/km);纬度低 $|E_p|$ 幅度偏大(如泉州台纬度最低,北分量 $|E_p|$

是 20 mV/km,东分量 15 mV/km). 且似乎午前峰—谷幅度略大于午后.

3.2 与地方时的联系

由图 2 可见,链 a 各台站在午时(即 12 h 左右)日变化出现波峰和波谷. 部分台站之间存在少许相位差,是由于链 a 台站并不全在 118°E 经线上,位于此经线附近,经度偏东的台站相位早于经度偏西台站. 例如,绥化台经度为 126.9°E、满洲里台 117.43°E,绥化台波峰、波谷极值时间早于满洲里台,而满洲里、郯城、泉州台(自东向西顺序)经度接近,基本无相位差.

选取链 d 台站观测数据,并按劳埃德(Loyd)天文季节的 D 季节(11、12、1、2 月)、J 季节(5、6、7、8 月)和 E 季节(3、4、9、10 月)进一步研究日变化随着地方时的变化(即“经度效应”). 在 2011、2008、2010 年中不同的天文季节中各选一个磁静日,比较链 d 台站在同一天的地电日变化波形(图 3). 图中各台依从东到西的顺序上下排列,这些台站分布在 79.9°E—120.5°E 之间,最大台间距超过 3700 km. 通过图中的辅助线可清晰地看到日变化相位有经度效应,随着经度偏西,日变化相位依次滞后. 例如,2011 年 1 月 5 日和 2008 年 3 月 7 日的日变化相位的经度效应最明显,2010 年 8 月 22 日较明显,但不如前两个图(因数据质量影响). 从 1 月 5 日地电场日变化可明显看出:江苏海安、新疆和田台第二个波谷到达的时差约为 2.7 h,与两台站经度差(约 40.6°)对应的地方时差(约 2.7 h)相符(见图中辅助线);高邮—和田、郯城—和田波形相位约 2.6 h,吻合台站当地的时差;其次,海安—周至、周至—都兰、都兰—和田台时差依次分别为 0.82、0.9、1 h,日变化相位差依次分别为 0.82、1.08、1 h. 显然,地电场日变化两次起伏的相位存在明显的经度效应,相位差与台站之间当地的时差很吻合.

同时还注意到,地电场快变化成分是相当同步的,无时差(见 2011 年 1 月 5 日图 0~240 min 和 1320 min 前后、2010 年 8 月 22 日图 0~120 min). 实际上,在数据处理中注意到此类快变化现象是普遍存在的,特别是在地电暴期间. 说明地电日变化相位存在经度效应,而快变化同步,似乎反应了二者的“源”因素有区别.

分析了经度链 b、纬度链 c 台站地电日变化波形、经度效应,其结果与经度链 a、纬度链 d 的结果类似. 另需说明,链 a—d 个别台站地电日变化波形、经度效应不很符合前面的结果,这种情况可能与台

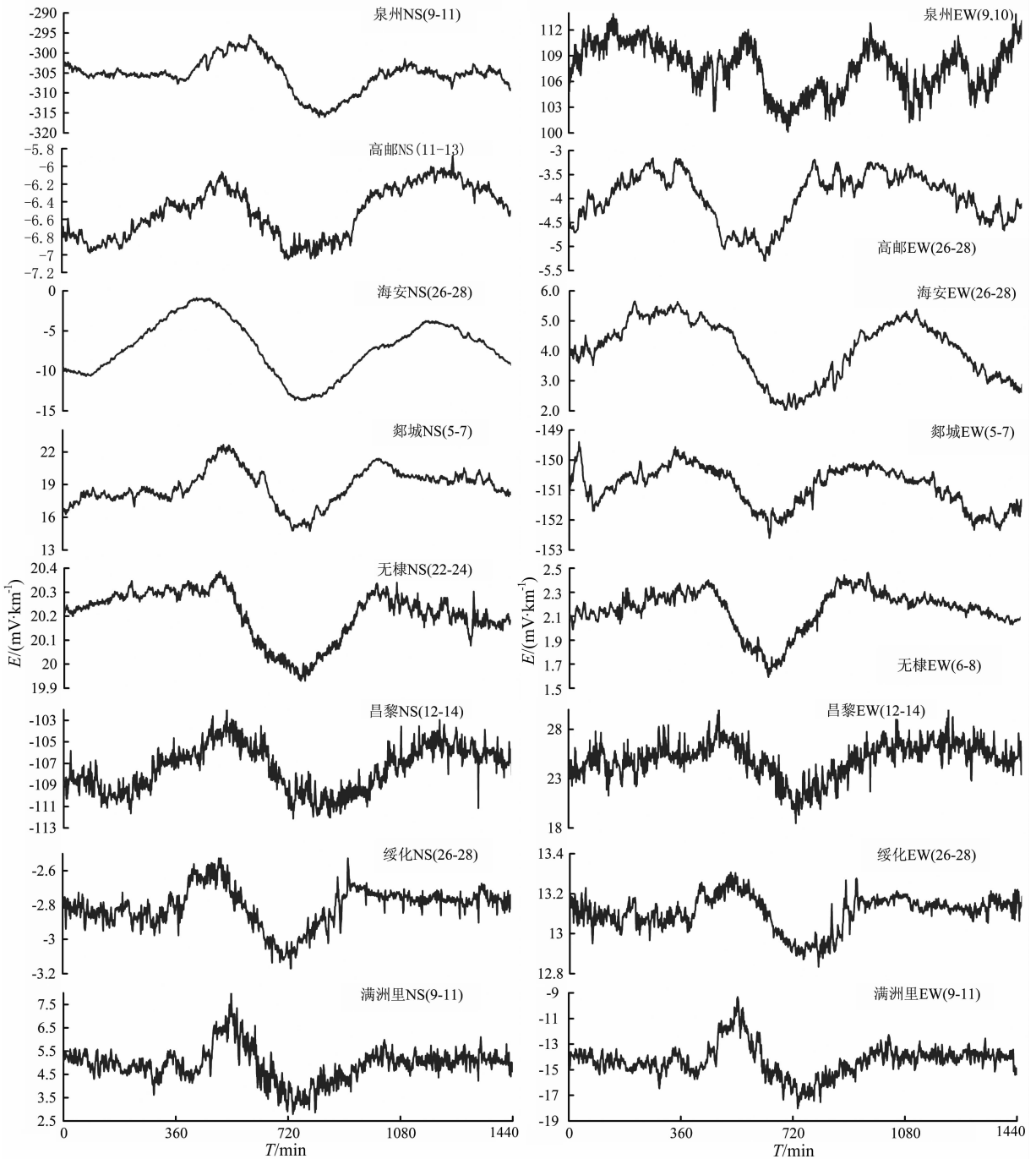


图 2 2010 年 2 月链 a 磁静日地电场数据时序迭加曲线

Fig. 2 The mean curves of geoelectric field on magnetically quiet day in Feb, 2010

站观测环境、技术系统运行等因素有关;个别台站日变化波形还表现为 1 峰—1 谷的形态.其次,极个别台站观测数据不可用,文中未应用.

4 地电场日变化周期成分

4.1 数据处理

在地电场频率域变化的分析中,用快速傅里叶

变换方法(FFT)处理了 4 条经、纬链上共 14 个台站 2010—2011 两年内 116 个月的地电场分钟值数据.由于日变化是频率极低的成分,为了客观获得日变化的周期成分,每个台站选取 3~5 个月的地电场北分量 E_x 和东分量 E_y 观测数据,且在选取数据时段的每个月各分量分钟值数据组成 1 个长度约为 43200 的时间序列,使时间序列长度内能足够包涵多个日变化周期成分.

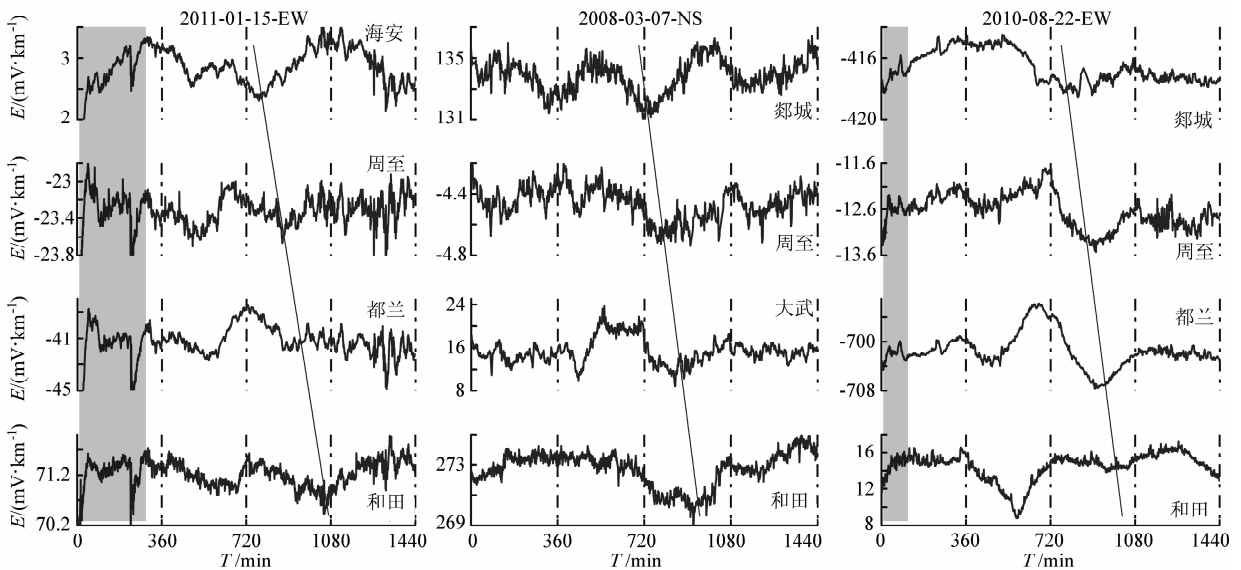


图 3 链 d 台站地电场相位随经度的变化

Fig. 3 The phasic changes of geoelectrical field along with chain 'd'

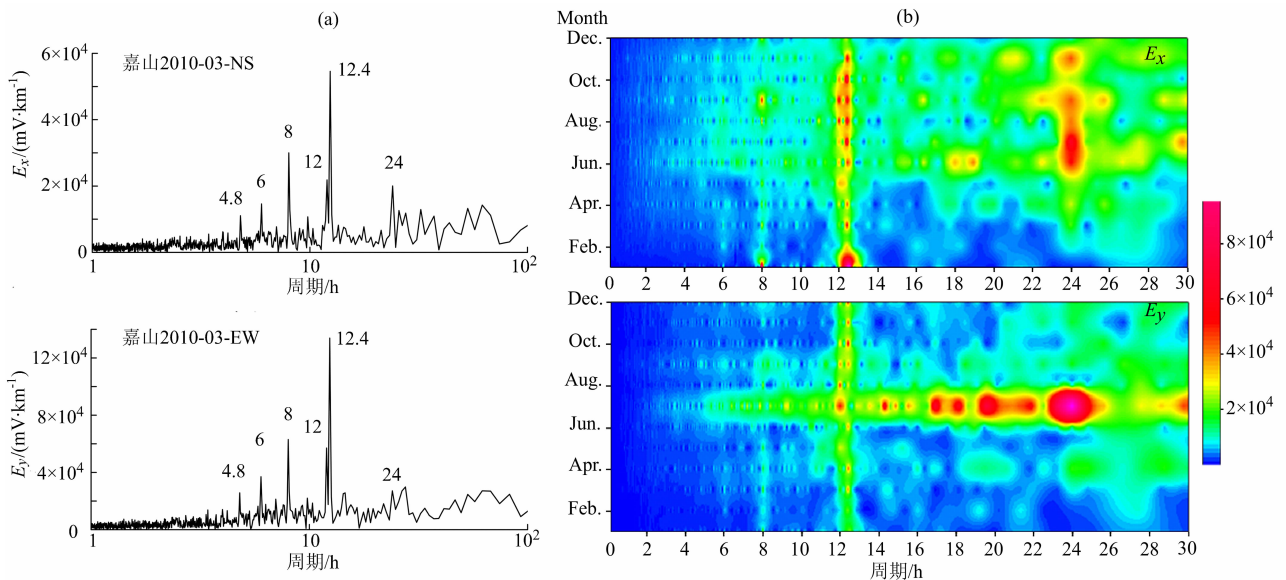


图 4 嘉山台地电场日变化 FFT 振幅谱(上图: NS 测道; 下图: EW 测道)

(a)2010 年 3 月地电场 FFT 谱; (b)2010 年地电场 FFT 谱时频图.

Fig. 4 The amplitude spectrums of geoelectrical field on Jiashan station(the above; channel-NS, the below; channel-EW)

(a)The results of the data in Mar. 2010; (b)The time-frequency diagrams of the data in 2010.

4.2 周期特性

图 4a 是嘉山台 2010 年 3 月地电场 E_x 和 E_y 观测数据的 FFT 振幅谱. 从图中可以清楚地看到, 优势周期的幅值从大到小排列依次为: 12.4、8、24 h、12、6、4.8 h, 其中 12.4 h 为最优势周期. 在对其他台站数据的处理过程中, 较明显的优势周期中还出现了 25.6、4 h 周期, 但其幅度明显小于前面几个周期成分的幅度. 处理其他月份的观测数据, 其结果类似图 4a. 图 4b 为 2010 年全年嘉山台地电场 E_x 和

E_y 观测数据 FFT 振幅谱时频图. 由图可见: ① 6 h、8、12.4、24 h 周期成分的谱幅度相对其他周期成分占优势, 其中 12.4 h 周期成分的谱幅在全年显著, 24 h 周期成分在夏季比其他季节显著; ② 夏季幅值大, 冬季幅值小, 特别是 E_y 分量更明显.

表 1 是 2011 年 1、2、3、7、10 共 5 个月, 链 a 的泉州、海安、高邮、嘉山 4 个台站两个测道的地电场数据 FFT 振幅谱统计的优势周期. 除表 1 中的 4 个台外, 还对链 a 的鄯城、无棣、绥化、满洲里 4 个台观

测数据做了谱分析(篇幅所限未列出). 8 个台每台每月各分量谱分析结果记为一组, 共计 80 组, 在振幅谱中可明显识别的优势周期共有 333 个. 表 1 中每组数据依谱幅从大到小排列. 由表可见, 12.4 h、12 h 以及 24 h 周期为优势周期, 而 12.4 h 周期为优势周期中出现频次最高的周期成分. 其次 8、6 h 等周期成分也多次出现, 还间或出现约 25.6 h 的周期成分. 同时注意到, 除泉州台 1、2、3 月外, 其余台站 E_x 、 E_y 两个分量优势周期相同或接近, 其次不同月份优势周期也相同.

表 1 链 a 四台站地电场数据振幅谱优势周期

Table 1 Preferred periods in amplitude spectrums of 4 geoelectrical field stations

月份	泉州 N	泉州 E	海安 N	海安 E	高邮 N	高邮 E	嘉山 N	嘉山 E
一月	12	24	12.4	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5
	8	12	12	12	12	8	8	8
	24	12.48	24	8	21.36	12	6	6
	12.48	6	8	24	8	6	4	4
	6	8	6	25.66		4	4.8	4.8
4.8			6					
二月	12	24	12.4	12.4	12.48	12.48	12.39	12.39
	25.86	12.48	12	12	12	12	8	8
	8	6	8	24	8	7.61	6	6
	12.44	8	24	8	24		24	
			6	5.91	6			
三月	12	24	12.4	12.4	12.41	12.4	12.4	12.4
	24	12.29	12	12	12	12	8	8
	8	8	8	24	8	24	12	12
	12.6	6	24	25.66	22.5	25.66	24	6
	6	4.8	6	8		8	6	24
					6	4.8	4.8	
七月	24	24	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	24
	12.3	12	12	12	12	12	24	
	8	4.8	8	24	8	24	12	
	4.8	6	25.66	8	24	8	8	
	6					25.66		
十月	24	24	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
	12.43	12.43	12	12	12	12	12	12
	8	8	8	25.66	8	8	24	25.66
	6	4.8	24	8	6	6	9.07	8.18
			25.66	6	4.8	4.8		
		6	24					

表 2 是对链 a、链 b 台站地电场数据 FFT 振幅谱的统计(链 b 取腾冲、泸沽湖、古浪、石嘴山、山丹、高台 6 个台 2011 年 2、8、10 月的数据). 可以看出链 a 台站每月每台站出现 8 h 和 12 h 周期成分的频次最高, 按频次统计组发生率分别为 87.5% 和 80%, 6、24、12.4 h 三种周期的组发生率相近, 也都在 60% 以上, 其次还有 4.8、25.6 h 和 4 h 三种周期成分, 但明显不及前 5 个周期成分出现的频次高. 其他周期的组发生率的总和仅为 13.8%. 因为地电场观测对环境干扰、电极稳定性、线路绝缘以及地下介质电性变化等因素敏感, 易发生数据异常, 少数不常见的周期成分可能是由于以上因素的影响. 需指出, 由于数据质量和谱估计误差, 统计中提到的某一周期是指此周期 ± 0.1 h 范围(如 12.4 h 指 12.4 ± 0.1 h). 与链 a 相比, 链 b 台站每组 FFT 谱中可分辨的优势周期的个数平均为 3.11 个, 低于链 a 台站每组平均 4.16 个, 可能因为链 b 位于我国西部, 台站环境艰苦、观测数据质量整体不如链 a 台站. 如云南腾冲、四川泸沽湖台存在观测场地环境干扰, 可分辨的周期较少或无优势周期. 链 b 台站主要周期按频次依次为 12、8、24 h, 组发生率在 60% 以上, 其中 12 h 组发生率最高, 为 80.6%; 其余组发生率较高的周期成分为 6、4.8 h. 与链 a 不同的是, 在链 a 台站出现 12.4 h 周期成分的频次高, 组发生率高达 62.5%, 而链 b 台站仅为 2.78%, 25.7 h 周期的频次也仅为 2.78%.

按最大 FFT 谱幅出现的频次统计(表 3), 在链 a 的 80 组数据(即 80 个月数据)中, 12.4 h 周期成分的频次最高, 为 42.5%, 其余依次为 12、8、24 h. 说明在链 a 的 8 个台站中, 地电日变化主要是由 12.4、12、8 h 和 24 h 周期成分组成, 其中 12.4 h 周期幅值最显著, 虽然 4.8、25.7、4 h 周期波也较常见, 但非普遍存在、振幅不大; 链 b 台站 36 组数据中最大谱幅的周期成分出现频次最高为 12 h, 其次是 8 h 和 24 h 周期成分.

总之, 在两个经度链上地电日变化可分辨的优势周期按周期成分的振幅大小主要有 12.4、12 h、8、24、6、4.8、4、25.7 h, 但两条经度链上各自的优势周期成分又有区别. 链 a 台站 12.4 h 周期最显著, 链 b 台站 12 h 周期成分最优显著.

对郯城 2010 年 1 月 6—8 日三个磁静日的地电场观测数据进行时序迭加处理, 提取其中振幅最大的前 5 阶谐波进行反变换拟合. 图 5 中灰色曲线为原始曲线, 黑色为拟合曲线, 拟合曲线很好地近似了

表 2 链 a、链 b 地电场优势周期统计表

Table 2 The statistical table of preferred periods of geoelectric field in chains 'a' and chain 'b'

经度链	周期/h	25.655	24	12.4	12	8	6	4.8	4	其他周期
118°E 链	发生次数/次	10	54	50	64	70	55	13	6	11
	组发生率/(%)	12.5	67.5	62.5	80	87.5	68.8	16.3	7.5	13.8
	总发生率/(%)	3	16.2	15	19.2	21	16.5	3.9	1.8	3.3
99°E 链	发生次数/次	1	22	1	29	27	16	8	4	4
	组发生率/(%)	2.8	61.1	2.8	80.6	75	44.4	22.2	11.1	11.1
	总发生率/(%)	0.9	19.6	0.9	25.9	24.1	14.3	7.1	3.6	3.6

注:组发生率,在每组(每台各分量每月数据组成 1 个时间序列,链 a 组数为 80,链 b 为 36)FFT 优势周期中出现的平均比率;

总发生率:在所有优势周期成分个数中的平均比率(链 a 周期 333 个,链 b 周期 108 个).

表 3 链 a 和链 b 地电场 FFT 最大振幅周期频次统计表

Table 3 The statistical table of the most preferred periods of geoelectric field in chains 'a' and chain 'b'

经度链	周期/h	25.655	24	12.4	12	8	6	4.8	4
118°E 链	发生次数/次	0	14	34	19	14	0	0	0
	组发生率/(%)	0	12.5	42.5	23.8	17.5	0	0	0
99°E 链	发生次数/次	0	7	0	15	11	0	0	0
	组发生率/(%)	0	19.4	0	41.7	30.6	0	0	0

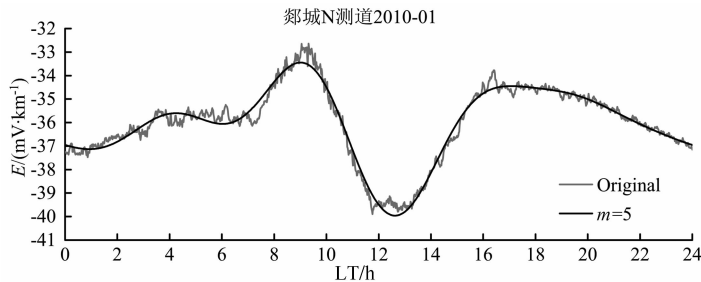


图 5 郟城台地电场 N 测道 2010 年 1 月份 3 天静日平均后的谐波拟合

Fig. 5 The harmonic waves synthesis of 3-quiet-day average of Tancheng station channel N in Jan. 2010

原始曲线. 前 5 阶谐波振幅依次为 1.67、1.01、0.88、0.33 和 0.26 mV, 其中 12 h 和 8h 周期成分的振幅最大.

文献[24]给出了用 FFT 处理的美国图森台 1 个月地磁场 Sq 日变化的主要周期,按幅值大小其主要周期成分依次为 24 h、12 h 和 8 h 周期等,说明地磁场 Sq 日变化主要周期成分为每日一次起伏. 本文用每台、每测道 1 个月的数据组成长时间序列,其周期成分估算应准确,按幅值大小分别为 12.4、12 h、8、24 h,与文献[21-22]用最大熵方法估算的昌黎、宝坻、嘉峪关台地电日变化主要周期成分为 12、24 h 和 8 h 左右周期的结果吻合,说明地电日变化每日两次起伏为主,符合图 2—3 中地电日变化波形. 需说明:极个别台站日变化周期不是 12.4 h/12 h,例如满洲里台主要为 8 h 周期.

5 地电日变化幅度

由于地电日变化主要为每日两次起伏,故对日变化幅度的分析针对 12 h/12.4 h 半日波. 选取链 a 台站 2010 年每个天文季节中 1 个月磁静日 3 天数据统计日变化峰—谷幅度 $|E_p|$. 选取 2、8、10 月代表 D、J、E 季节,并在图 6 中分别用黑、红、蓝三种颜色分别表示(若某月出现数据异常,用相同天文季节内其他月份数据代替) $|E_p|$. 图 6a 是链 a 的 11 个台 E_x 分量 $|E_p|$ 随纬度的变化,图 6b 是 E_y 分量 $|E_p|$ 随纬度的变化,图 6c 是各台站 E_x 、 E_y 分量 $|E_p|$ 分别平均的结果. 由图可见,链 a 台站 $|E_p|$ 从约 1~23 mV/km 不等,且随纬度升高 $|E_p|$ 大致的逐渐减小,不过图 6a 中 E_x 结果有些凌乱. 根据

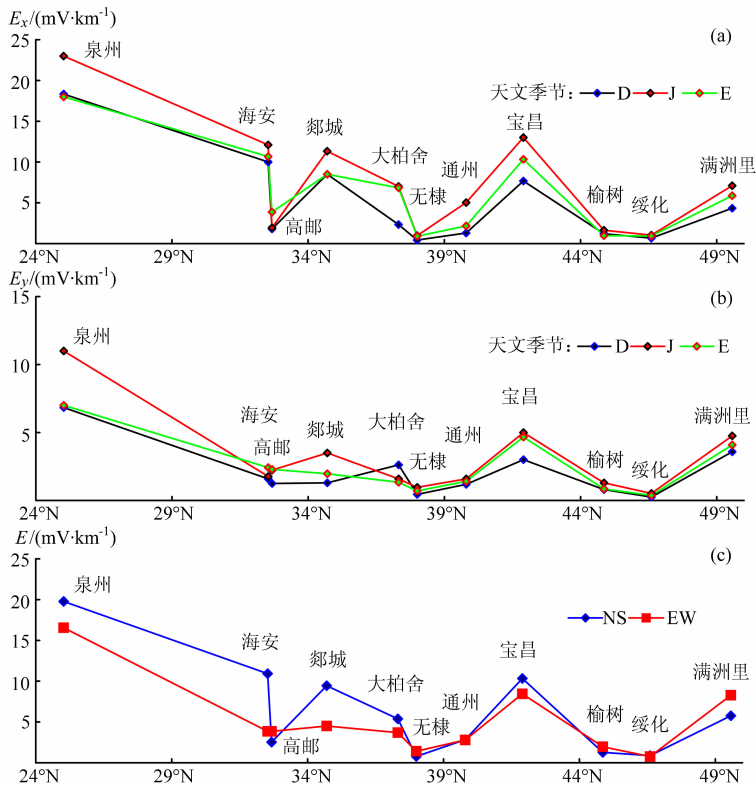


图 6 2010 年经度链 a 地电场峰—谷幅度

Fig. 6 The changes of amplitude of geoelectrical field in chains "a" in 2010

电阻介质的欧姆定律 $J = \sigma \cdot E$ (电导率 $\sigma = 1/\rho$), 电场强度与介质电阻率 ρ 有关. 事实上, 我国地电场观测的电极埋在表层 3 m 左右深度, 在欧姆定律中用地表视电阻率 ρ_s 代替 ρ 即可. 文献[21]研究了“九五”几个地电场台站的 $|E_p|$ 与台址表层 ρ_s 的关系, 得到: 表层 ρ_s 大, 则 $|E_p|$ 大. 图 6 中 $|E_p|$ 随纬度增高呈现略凌乱的现象是台址浅层电导率不同引起的. 例如满洲里、泉州、宝昌台表层介质电测深视电阻率依次为 150~200 Ωm , 大于无棣、高邮、郟城、海安、通州、绥化、榆树、大柏舍等台站几 Ωm ~60 Ωm , 宝昌、满洲里台 $|E_p|$ 较大、离散, 无棣、高邮台 $|E_p|$ 小、离散. 海安与郟城、通州与绥化、大柏舍与榆树台表层电阻率相差无几, 则纬度高、日变幅度小.

同时, 由图 6(a—b) 得到, J 季节的红色曲线高于 E、D 季节的绿色和黑色曲线, 而 D 季节黑色曲线最低. 分别统计图 6(a—b) 展示的三个季节各台站的 $|E_p|$ 平均幅度得到: 在 J 季节, E_x 平均幅度为 7.65 mV/km, E_y 为 6.22 mV/km; 在 E 季节, E_x 为 6.28 mV/km, E_y 为 4.92 mV/km; 在 D 季节, E_x 为 5.14 mV/km, E_y 为 4.15 mV/km. 显然, 在天文季节的夏季 $|E_p|$ 大, 春秋季节其次, 冬季最小. 这个结果与文献[21]应用当时少数几个台站观

测数据的研究结果一致. 另外注意到: 无论在哪个天文季节, 都是地电场北向分量 E_x 日变幅度 $|E_p|$ 大于东向分量 E_y 的 $|E_p|$.

选取链 b 的 12 个台站观测数据, 按链 a 方法统计 $|E_p|$ 的纬度效应得到, 从约 N35° 开始随纬度增高、降低 $|E_p|$ 大致呈现逐步减小的现象(篇幅所限图未示). 据近年来的全国地电场台网观测资料质量评比成绩, 链 b 台站观测质量整体上低于链 a 台站, 且链 b 台站分布在南北地震带构造活动区, 影响了对正常地电日变化 $|E_p|$ 的分析效果, 与链 a 结果相比链 b 可应用数据的台站少, 统计结果较为离散、凌乱, 但总体来看链 b 台站从 N35° 开始随纬度增高、降低, 而 $|E_p|$ 分别呈现逐步减小的现象.

应用纬度链 d 自西到东 11 个台站的地电场 E_x 、 E_y 分量观测数据, 按链 a 方法分析了各台站的 $|E_p|$, 其中 9 个台站的 $|E_p|$ 集中在约 1~11 mV/km 之间起伏变化, 不呈现与经度有关的 $|E_p|$ 规律性变化.

6 问题讨论

6.1 日变化幅度随纬度的变化

吉什和鲁尼据全球地电场数据绘制了 1936 年

世界时 18 时的全球涡旋地电流分布图的概貌^[1], 在北半球的中低纬度区、高纬度区各分布 4 个涡旋场, 中低纬度涡旋中心在 30°N 附近, 在高纬度区接近 70°N 附近, 各涡旋分布相对于太阳的位置固定. 其中, 中低纬度涡旋中心大致在 25°N、120°E 和 35°N、70°E 的 2 个涡旋电流场覆盖或邻近中国大陆(在世界时 18 时), 东部链 a、西部链 b 两个子午链台站分布在 25°N—49.57°N 的中低—中纬度范围, 两个涡旋电流场覆盖链 a、链 b 台站. 由于各涡旋分布相对于太阳的位置固定不变, 在一天当中世界时的另外时刻, 链 a、链 b 台站还要经过另外两个中低纬度区的涡旋电流场. 对于链 a, 泉州(25.02°N、118.51°E)—满洲里(49.57°N、117.43°E)共 14 个台站日变化幅度 $|E_p|$ 随纬度升高总体上逐步减小; 对于链 b, 腾冲(25°N、98.50°E)—嘉峪关(39.80°N、98.22°E)共 12 个台站 $|E_p|$ 从大致 35°N 开始随纬度增高和降低而逐步减小; 且纬度链台站地电日变化的相位差相当对应当地的地方时. 上述日变化幅度的表现似乎说明, 位于中低纬度区的涡旋电流场分布与链 a、链 b 台站的日变化幅度不无关系. 普遍认为引起地电静日变化的电流系主要分布在中、低纬度区上空的电离层中, 扰日变化与高纬的涡旋电流相对应^[7]. 在地电场变化的分析中, 我们注意到地电日变化相位差明显对应地方时的时差, 但快变化在纬度链上大空间范围(超过 3700 km 台站间距)同步变化, 说明日变化和快变化似乎存在影响因素的差异, 可能是在太阳风的作用下, 电离层中的电流系引起了地面涡旋电流场电流强度的变化, 造成了 $|E_p|$ 随纬度的变化.

6.2 日变化主要周期成分

地电场 Sq 和低磁情日变化主要为 12.4 h (链 a)、12 h (链 b)、8 h 和 24 h 周期成分以及 6、4.8 h、4 h 等成分, 其中 12.4 h 周期是主太阴半日分潮(M2 波), 12 h 周期是主太阳半日分潮(S2 波), 24 h 是太阳赤纬全日分潮(P1 波), 8、6、4.8、4 h 也是潮汐调和分量. 在这些周期成分中, 24、12、8、6、4.8 h 成分与变化地磁场 Sq 谐波成分一致, 文献[24]关于变化磁场中的上述谐波分量已做了详细研究, 认为这些成分与中高层大气及电离层中的潮汐发电机理论息息相关. 月球、太阳依次是地球潮汐现象的主要贡献者, 链 a 台站地电日变化最主要是 M2 波周期, 链 b 台站最主要是 S2 波周期, 这些周期成分是主要的潮汐调和分量, 因此认为地电日变化的主要周期与月日引潮力直接有关. 半日潮每天两次高潮和两

次低潮, 全日潮每天一次循环, 在引潮力作用下固体地球、大气层、电离层、海洋、湖泊等产生的潮汐现象引起了地面电流涡旋场强度发生周而复始的变化, 引起了上述地电日变化的主要周期成分, 即以 12.4 h、12、24 h 周期成分的幅度为最显著的日变化.

文献[23]研究了潮汐对岩石中裂隙走向的优势趋向作用和裂隙水渗流对地电场潮汐响应的影响. 地壳介质中普遍存在裂隙诱发的各向异性^[25], 实际上该文讨论了介质中微裂隙走向优势趋向(或定向排列)构成的各向异性介质中传导电流引起的地电场变化的情况, 导电机理主要是介质中的动电效应, 导电溶液运移和微裂隙、孔隙是重要因素. 地电场观测地表两个水平正交分量, 本文应用上述微裂隙构成的方位各向异性介质进一步讨论月日引潮力对地电日变化的影响. 在这种介质中欧姆定律是张量表示式, 在微裂隙优势趋向方向及其垂直方向(即各向异性介质的两个水平电性主轴方向)的电场分量强度 $|E|$ 只与各自的电阻率 ρ 、电流密度 $|J|$ 有关. 地电场测量电极埋在 3 m 左右的土壤介质中, 欧姆定律中 $|E| \propto \rho_s$ 和 $|J|$. 文献[26]给出了这种介质中视电阻率变化 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 与饱水的固体介质骨架电阻率 ρ_o 、裂隙水电阻率 ρ_f (一般情况下 $\rho_f \ll \rho_o$) 和裂隙率 ν 及其变化 $\Delta\nu/\nu$ 的本构关系. 据此本构关系, 当无附加荷载时, 介质无变形(即 $\Delta\nu/\nu \rightarrow 0$), 则介质视电阻率不变化(即 $\Delta\rho_s/\rho_s \rightarrow 0$), 相应地介质中 $|J|$ 不变、 $|E|$ 亦不变; 当月日正对地球某区域时引潮力最大, 介质膨胀、微裂隙“张开”或产生新增微裂隙, 即 $\Delta\nu/\nu > 0$, 介质中含电粒子、电荷等的水溶液等沿微裂隙优势取向方向运移, 同时导电通道链通、 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 负向增大使 ρ_s 减小, 介质中产生附加电流, 此时电场强度 $|E|$ 将出现一次极值过程; 在引潮力最小的区域, 介质被压缩、微裂隙“闭合”, 即 $\Delta\nu/\nu < 0$, 水溶液等不易运移, 同时导电通道阻塞、 $\Delta\rho_s/\rho_s$ 正向增大使 ρ_s 增大, 此时 $|E|$ 将出现一次相反的极值过程. 于是, 一天中顺潮、背朝的两次潮汐过程造成了涡旋电流强度周而复始的变化, 造成了周期 12.4、12 h 精确对应 M2 波、S2 波的地电日变化半日波成分.

另一方面, 空间电流系也是影响地电日变化的重要因素. 地电日变化的午前午后表现类似于变化磁场 Sq, 据文献[24, 27], 变化磁场 Sq 午前午后的不对称现象起因于低纬电流系和高纬电流系. 其次, 比较分析地电日变化波形与钻孔应变、静水位、重力等观测的半日潮波形可知, 地电日变化与应变等半

日波存在明显的相位差和视周期差异. 这种差异表明电离层、大气层等的电动力学过程也是影响地电日变化的重要原因. 因此, 本文认为月日引潮力引起的地面涡旋电流场电流强度的变化和太阳风等引起的空间电磁活动共同产生了地电日变化的半日波成分.

链 a 台站一般位于我国东部海拔低于 500 m 的区域, 且邻海/湖等水系居多, 日变化半日波周期为 12.4 h, 而链 b 台站一般位于海拔约 1500 m 及以上的高原区, 半日波周期为 12 h. 其周期差异的原因可能是链 a 台站地下介质内部水网络发育, 月球引潮力的作用更明显, 对于链 b 台站空间电磁活动的作用更明显.

7 结 论

(1) 沿两个经度链、纬度链台站的地电日变化绝大多数表现为两峰—两谷的变化波形, 波峰、波谷出现在当地时午前午后时段, 一般午前日变化幅度 $|E_p|$ 略大于午后 $|E_p|$.

(2) 地电日变化周期成分按最大幅度出现的频次排序依次为 12.4、12、8、24、6、4、8、4、25.7 h 周期等, 这些周期是潮汐调和分量. 其中在 118°E 链台站以主太阴半日波(M2 波)12.4 h 为最主要周期, 99°E 链以主太阳半日分波(S2 波)12 h 为最主要周期.

(3) 纬度链地电日变化半日波相位差与台站之间的地方时的时差一致, 表现为经度偏东台站早于偏西台站的经度效应.

(4) 地电日变化半日波周期成分的幅度有纬度效应, 总体上, 118°E 链从福建泉州—内蒙古满洲里台日变化幅度逐渐减小, 99°E 链从约 35°N 开始大致随纬度分别增高和降低而日变化幅度减小; Loyd 天文季节的夏季日变化幅度最大, 春秋季节其次, 冬季最小; 绝大多数台站地电场北分量 E_x 日变化幅度大于东分量 E_y ; 地电日变化幅度与台址浅层电阻率存在正比关系.

(5) 月日引潮力引起的地面涡旋电流场的电流强度变化和太阳风引起的大气层、电离层电磁活动共同产生了地电日变化的半日波周期成分.

致 谢 十分感谢两位审稿专家和编辑部对本文付出的辛勤工作, 审稿专家对文中逐句修改, 并提出多条具体的修改意见和建议, 体现了科学、严谨的学风.

参考文献(References)

[1] 克拉耶夫. 地电原理. 张可迁, 陈培光, 张志诚等译. 北京:

地质出版社, 1954: 100-236.

A П КРАЕВ. Geoelectrics Principle (in Chinese). Zhang K Q, Chen P G, Zhang Z C, et al. Trans. Beijing: Geological Publishing House, 1954: 100-236.

[2] Lanzerotti L J, Sayres D S, Medford L V, et al. Response of large-scale geoelectric fields to identified interplanetary disturbances and the equatorial ring current. *Adv. Space Res.*, 2000, 26(1): 21-26.

[3] Pirjola R. Effects of space weather on high-latitude ground systems. *Adv. Space Res.*, 2005, 36(12): 2231-2240.

[4] Burns G B, Hesse M H, Parcell S K, et al. The geoelectric field at Davis station, Antarctica. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1995, 57(14): 1783-1797.

[5] Corney R C, Burns G B, Michael K, et al. The influence of polar-cap convection on the geoelectric field at Vostok, Antarctica. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2003, 65(3): 345-354.

[6] 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础. 北京: 科学出版社, 1985: 203-254.

Fu C Y, Chen Y T, Qi G Z. Geophysical Fundamentals (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985: 203-254.

[7] 孙正江, 王华俊. 地电概论. 北京: 地震出版社, 1990: 3-95. Sun Z J, Wang H J. Introduction of Geoelectricity (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1990: 3-95.

[8] 李金铭. 地电场与电法勘探. 北京: 地质出版社, 2005: 36-59.

Li J M. Geoelectric Field and Electrical Exploration (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2005: 36-59.

[9] Uyeda S. Introduction to the VAN Method of Earthquake Prediction. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1995: 3-28.

[10] Varotsos P, Alexopoulos K. Physical properties of the variation of the electric field of the earth preceding earthquake. *Tectonophysics*, 1984, 110(1-2): 73-98.

[11] Zlotnicki J, Kossobokov V, Le Mouél J L. Frequency spectral properties of an ULF electromagnetic signal around the 21 July 1995, $M=5.7$, Yong Deng (China) earthquake. *Tectonophysics*, 2001, 334(3-4): 259-270.

[12] 李宁, 杜学彬, 谭大诚等. 松山观测台地震短临电磁现象. 地震, 2007, 27(增刊): 103-111.

Li N, Du X B, Tan D C, et al. Imminent electro-magnetic phenomenon related to earthquakes recorded at the Songshan Station. *Earthquake* (in Chinese), 2007, 27(Supple): 103-111.

[13] 范莹莹, 杜学彬, Zlotnicki J 等. 汶川 $M_s 8.0$ 大震前的电磁现象. 地球物理学报, 2010, 53(12): 2887-2898.

Fan Y Y, Du X B, Zlotnicki J, et al. The electromagnetic phenomena before the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese) 2010, 53(6): 2887-2898.

[14] 刘君, 杜学彬, Zlotnicki J 等. 几次大震前的地面和空间电磁场变化. 地球物理学报, 2010, 54(11): 2885-2897.

- Liu J, Du X B, Zlotnicki J, et al. The changes of the ground and ionosphere electric/magnetic fields before several great earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 54(11): 2885-2897.
- [15] 汤吉, 詹艳, 王立凤等. 5月12日汶川8.0级地震强余震观测的电磁同震效应. *地震地质*, 2008, 30(3): 739-745.
Tang J, Zhan Y, Wang L F, et al. Coseismic signal associated with aftershock of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, 30(3): 739-745.
- [16] 黄清华, 刘涛. 新岛台地电场的潮汐响应与地震. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1745-1754.
Huang Q H, Liu T. Earthquakes and tide response of geoelectric potential field at the Niijima station. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(6): 1745-1754.
- [17] 郝锦琦, 钱书清, 高金田等. 岩石破裂过程中的超低频电磁异常. *地震学报*, 2003, 25(1): 102-111.
Hao J Q, Qian S Q, Gao J T, et al. ULF electric and magnetic anomalies accompanying the cracking of rock sample. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(1): 102-111.
- [18] 钱书清, 吕智, 任克新. 地震电磁辐射前兆不同步现象物理机制的实验研究. *地震学报*, 1998, 20(5): 535-540.
Qian S Q, Lü Z, Ren K X. Experimental study on the mechanism of non-synchronism of seismo-electromagnetic radiation precursors. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1998, 20(5): 535-540.
- [19] 钱家栋, 顾左文, 赵家骝等. 地震台站观测环境技术要求. 第2部分: 电磁观测(GB/T 195312-2004). 北京: 地震出版社, 2004.
Qian J D, Guo Z W, Zhao J L, et al. Technical Requirement for Observational Environment of Seismic Stations-Part 2: Electromagnetic Observation (GB/T 19531. 2-2004) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2004.
- [20] 杜学彬, 席继楼, 谭大诚等. 地震台站建设规范 地电台站 第2部分: 地电场台站(DB/T 18. 2-2006). 北京: 地震出版社, 2004.
Du X B, Xi J L, Tan D C, et al. Specification for the Construction of Seismic Station Geoelectrical Station Part 2: Geoelectrical Field Observatory (DB/T 18. 2-2006) (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2006.
- [21] 杜学彬, 叶青, 赵杰等. 地电场日变化研究. *地震*, 2007, 27(增刊): 121-130.
Du X B, Ye Q, Zhao J, et al. Study on geoelectric field daily variation. *Earthquake* (in Chinese), 2007, 27(Supple): 121-130.
- [22] 叶青, 杜学彬, 周克昌等. 大地电场变化的频谱特征. *地震学报*, 2007, 29(4): 382-390.
Ye Q, Du X B, Zhou K C, et al. Spectrum characteristics of geoelectric field variation. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2007, 29(4): 382-390.
- [23] 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. *地球物理学报*, 2011, 54(7): 1842-1853.
Tan D C, Wang L W, Zhao J L, et al. Influence factors of harmonic waves and directional waveforms of tidal geoelectrical field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(7): 1842-1853.
- [24] 徐文耀. 地磁学. 北京: 地震出版社, 2003: 221-349.
Xu W Y. Geomagnetism (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2003: 221-349.
- [25] Negi J G, Saraf P D. Anisotropy in Geoelectromagnetism. *Elsevier Science Publishing Company*, 1989: 1-88, 175-232.
- [26] 杜学彬, 李宁, 叶青等. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因. *地球物理学报*, 2007, 50(6): 1802-1810.
Du X B, Li N, Ye Q, et al. A possible reason for the anisotropic changes in apparent resistivity near the focal region of strong earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(6): 1802-1810.
- [27] 赵旭东, 杜爱民, 徐文耀等. Sq电流系午前午后不对称性现象的来源. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 643-649.
Zhao X D, Du A M, Xu W Y, et al. The origin of the prenoon-postnoon asymmetry for Sq current system. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 643-649.

(本文编辑 胡素芳)