

大地电场变化的频谱特征^{*}

叶 青¹⁾ 杜学彬²⁾ 周克昌¹⁾ 李 宁²⁾ 马占虎²⁾

1) 中国北京 100036 中国地震台网中心

2) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

摘要 处理了中国大陆地区嘉峪关、昌黎、崇明、蒙城、兴济、宝坻和阳原等 7 个台的地电场观测数据,应用最大熵谱方法研究了大地电场日变化、地电暴等谱成分的特征.结果表明,大地电场日变化主要是 12 h 的半日波成分最强,24~25 h 的全日波和 8 h 周期成分次之;地电暴是在大尺度空间同步发生的,其谱值高于日变化谱值约 2~3 个数量级,主要以较长周期成分为主.这一结果初步解释了大地电场变化的主要谱成分的生成机制.

关键词 大地电场 周期 最大熵谱 日变 地电暴

中图分类号: P319.1 **文献标识码:** A

引言

地球电磁场包括地磁场和地电场两个本质上密切相关的地球物理场.地电场分为大地电场和自然电场两部分.大地电场是太阳、太阴活动和地球自转及星际磁场等引起的地球外部的各种电流系,在地球内部感应产生的分布于整个地球表面或较大区域的变化电场;自然电场是地壳局部物理、化学条件变化引起的局部性电场(傅承义等,1985).20 世纪初随着工业发展对资源的迫切需求,地电场的研究和应用主要集中在探矿和地球结构勘探方面.在 20 世纪 70 年代前,限于当时的观测技术,国内外地电场观测和研究成果有限.70 年代后,希腊、法国、日本、中国等国家把地电场应用到地震、火山监测等地质灾害预警中.中国在“九五”后期开始了大规模、规范化的地电场观测.本文应用最大熵谱方法(徐伯勋,白旭滨,1990),分析研究了大地电场变化的频谱特征,期望为地震预测预报提供大地电场背景变化的基础,同时这也是地球电磁环境研究的一个方面.

1 数据处理方法

1.1 最大熵谱分析原理

最大熵谱方法的基本思想是不进行任何假设,根据已知数据信息预测未知延迟离散时间上的相关函数,外推相关函数时每一步都保持事件的不确定性或熵最大(韩大宇,1987).对于平稳随机序列 $\{X_n\}$,计算最大熵谱的问题是寻找满足约束条件的自相关函数与功率谱密度的关系,由给定数据求得有限个自相关函数,由变分原理求得最大熵功率谱密度(Fougere *et al.*, 1976):

* 国家自然科学基金(40474027)资助.

2007-01-29 收到初稿,2007-05-15 决定采用修改稿.

† 通讯作者. e-mail: qing_gef@yahoo.com.cn

$$\hat{S}_x(f) = \frac{P_M}{2f_c \left| 1 + \sum_{m=1}^M a_m e^{-j2\pi m f T} \right|^2} \tag{1}$$

式中， f 为频率， a_m 为预测误差系数， P_M 为预测误差功率， M 为滤波器阶数。 M 的选择在最大熵谱估计中起至关重要的作用，正确选择模型的阶数，可提高谱估计的分辨率，消除谱线分裂现象等(宋治平等，1997)。本文应用最终预测误差准则(FPE 准则)确定 M (王世一，1997)

$$F_{(pe)_M} = \frac{N+M+1}{N-M-1} P_M \tag{2}$$

P_M 随 M 的增大而减小，而 $(N+M+1)/(N-M-1)$ 随着 M 的增大而增大。 $F_{(pe)_M}$ 将在某个 $M = M_{opt}$ 处达到最小值，此 M_{opt} 就作为 $F_{(pe)_M}$ 准则所得的最佳阶数 M 。一般情况限定 $M_{max} \leq N/2$ ，应用以下经验公式确定 M ：

$$M = \begin{cases} \left(\frac{N}{3} - 1 \right) \sim \left(\frac{N}{2} - 1 \right) & 20 \leq N \leq 100 \\ (0.05 \sim 0.2) N & N > 100 \end{cases} \tag{3}$$

1.2 资料选取及计算

本文选择我国西北、华北、东北和华东地区观测质量较好的嘉峪关、昌黎、宝坻、阳原、崇明、蒙城、兴济等 7 个台的地电场观测数据。数据选取时段分别为根据中国科学院国家天文台太阳活动预报中心(Chinese Solar-Geophysical Data, 简称 CSGD)公布的地磁报告的地磁平静日、扰动日和磁情指数 $k < 5$ 的日期(中国科学院国家天文台太阳活动预报中心，2005)。数据样本长度分别为 1 天的分钟值或一个月的小时值时间序列，按抽样定理可分析的频率成分应小于 $1/120$ Hz。在实际计算中，频率分辨率小于 $\Delta f \leq 1/(200 \times 120)$ Hz，由实际分析来看这个分辨率较为合理。为了图示清楚，在相关图示中把谱值随频率的变化换算成随周期的变化来表示。

2 地电场日变化

图 1 是 2004 年 11 月 15 日安徽蒙城台地电场分钟值曲线。按 CSGD 地磁报告(中国科学院国家天文台太阳活动预报中心，2005)，该天是地磁平静日。

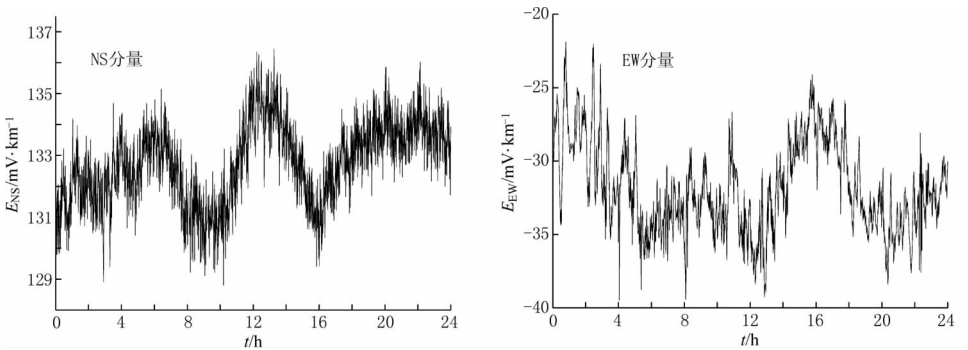


图 1 2004 年 11 月 15 日蒙城地电场分钟值曲线图

由图 1 可见，地电场 NS 分量和 EW 分量略显上、下漂移。两测道大地电场变化波形不同，NS 分量表现为近似地 2 峰—2 谷的日变化，日变化峰—峰值为 5.7 mV/km；EW 分

量日变化是 2 峰—2 谷型, 但与 NS 分量日变化波形不同, 峰—峰值幅度接近 13 mV/km ; NS 分量和 EW 分量的高频成分丰富, NS 分量的高频扰动比 EW 分量高频扰动的周期更短. 应用最大熵谱方法对图 1 进行谱估计, 结果示于图 2. 图中频谱周期分段为: 大于 1 h , $2.22 \sim 0.14 \text{ h}$ 和 $8 \sim 2 \text{ min}$ (图中前两个周期分段重叠是因为谱值差异大). 由图 2 可以看出, 两个分量的第一周期段中约 4 h 以上的周期成分十分发育, 其中 8 h 周期成分最显著, 其谱值高于其它两个周期分段谱值的 $1 \sim 2$ 个数量级. EW 分量明显大于 NS 分量的谱值, 两个分量的谱值差异与日变化幅度差异相对应. 在 $2.22 \sim 0.14 \text{ h}$ 周期段内, EW 分量大于 0.23 h 的周期成分非常强; 在 $8 \sim 2 \text{ min}$ 周期段内, NS 分量 $4 \sim 3.5 \text{ min}$ 周期成分非常发育. 后两个周期段谱值的差异符合 NS 分量和 EW 分量分钟值曲线中的高频扰动成分的差异, 说明谱估计计算方法和结果是正确的.

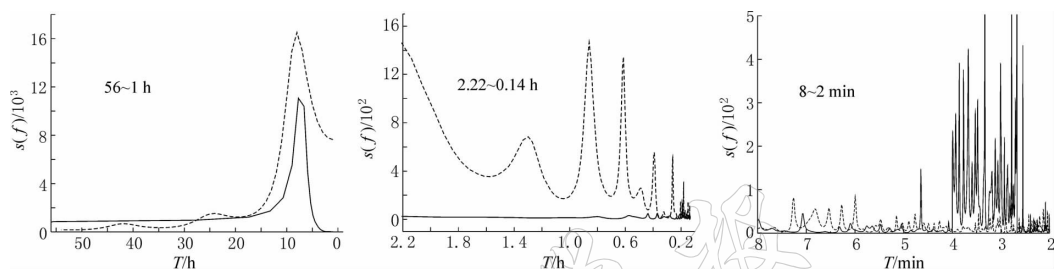


图 2 2004 年 11 月 15 日蒙城地电场频谱图 (实线表示 NS 分量; 虚线表示 EW 分量)

图 3 是 2004 年 11 月 15 日昌黎、宝坻、静海和兴济大地电场的频谱图, 图中周期分段与图 2 蒙城台周期分段相同. 同样, 第一周期段内约 4 h 以上的周期成分发育, 除了兴济台 18 h 的周期成分最强外, 其余 3 个台均是约 8 h 周期成分最强, 与蒙城地电场相同. 这 4 个台距离较近, 在此段内全部为 NS 分量的周期成分较强, 与蒙城台相反. 在第二周期段内, 周期较长的成分发育, 且除了宝坻台外其余 3 个台均为 EW 分量谱值大. 4 个台周期成分既存在集中出现的周期, 也存在某个台出现而其它台不出现的周期成分, 各台之间出现的周期成分不完全一一对应. 在第三个周期段内, 除了兴济台外其余 3 个台均是 NS 分量谱值高, 4 个台既存在集中出现的周期成分, 也存在各台之间不完全一一对应的周期成分.

总的来看, 应用昌黎、宝坻、静海和兴济 2004 年 11 月 15 日的分钟值观测数据计算的频谱, 均为 8 h 周期成分占主导, 而周期较短的后两个周期段各台既集中出现共同的周期成分, 同时也存在不完全一一对应的周期. 这 4 个台空间距离不大, 集中在京津地区及周围, 8 h 周期为中心的周期成分中 NS 分量比 EW 分量强, 较短周期成分中的周期强弱两个分量不定. 这种现象说明以 8 h 为中心周期的大地电场变化是较大区域出现的成分, 而较短周期成分既有大区域出现的周期成分也有与台站所在处的地壳介质局部性有关的周期成分. 同时注意到包括蒙城在内的 5 个台之间每个对应周期段的谱值存在数量级的差异, 即昌黎谱值最大, 宝坻、兴济、蒙城其次, 最小为静海. 这种现象也与台站所在处的地下介质有关^①.

考虑到应用 1 天时间的数据分析较长周期成分其数据长度短, 反映较长周期成分有困难, 为此, 我们应用昌黎、嘉峪关、崇明等 3 个台 1 个月时间的连续观测数据, 计算出小时

① 杜学彬, 叶青, 李宁, 等. 2006. 地球电场变化的基本要素研究结题报告.

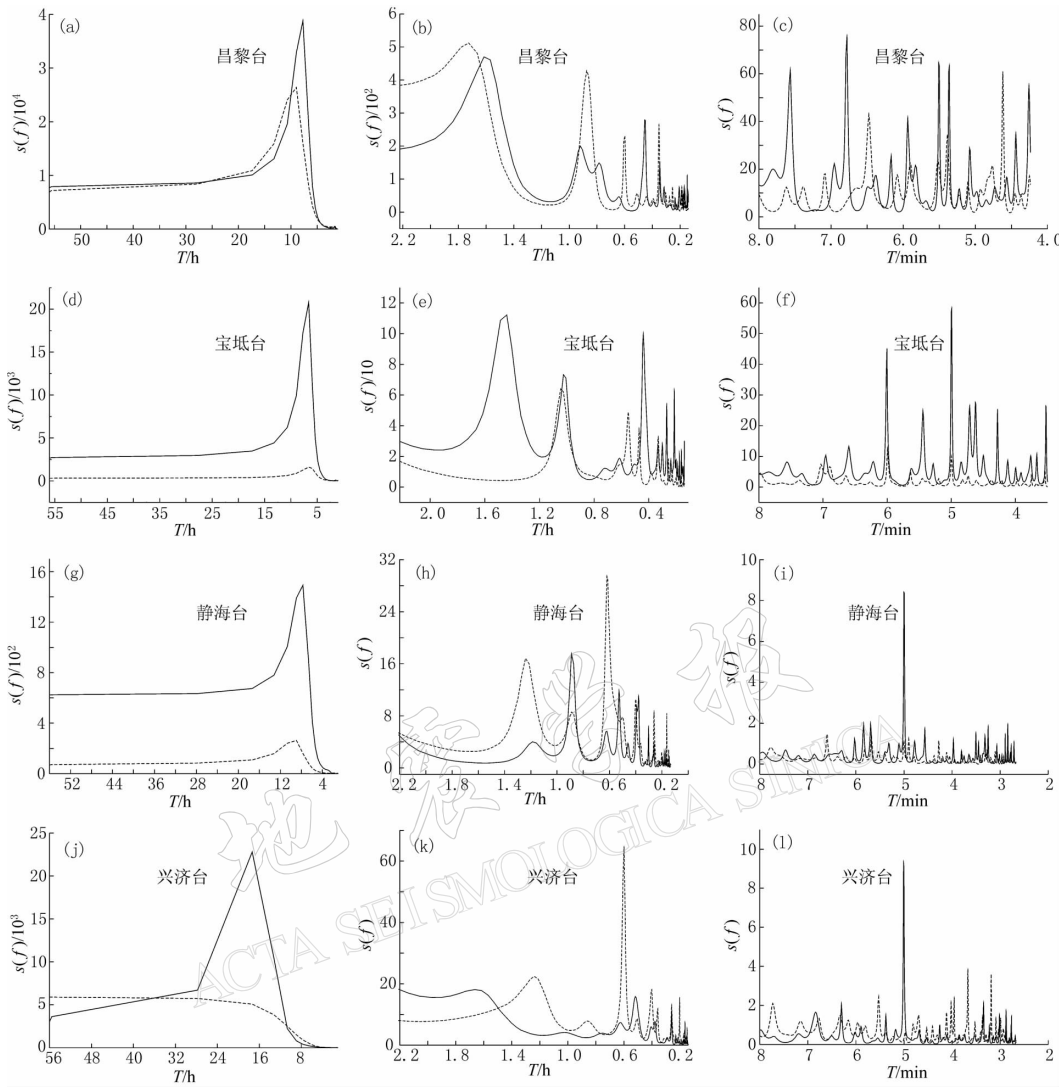


图3 2004年11月15日地电场频谱图(实线表示NS分量;虚线表示EW分量)
(a)、(d)、(g)、(j) 周期段为56~1 h; (b)、(e)、(h)、(k) 周期段为2.22~0.14 h;
(c)、(f)、(i)、(l) 周期段为8~2 min

值的时间连续序列并计算了频谱(图4)。因为大地电场日变化是一种全球性、区域性的变化,所以选取的3个台地理经、纬度不同,观测数据时段也不同。昌黎和崇明台经度接近而纬度不同(纬度相差 8°),昌黎与嘉峪关台纬度接近而经度不同(经度相差约 21°);崇明台是2002年6月的观测数据,昌黎台是2003年5月的数据,嘉峪关台是2004年8月的数据。由图4可见,3个台日变化主要周期成分集中在两个中心周期:最显著的周期成分是12 h为中心周期的半日波成分,其次是24~25 h为中心周期的全日波成分。3个台大地电场的半日波、全日波谱系图对应相似。3个台纬度、经度不同,观测数据年份、月份不同,地电场日变化周期集中在上述两个周期。说明半日波、全日波成分是大地电场日变化普遍存在的周期成分,具有广域性、普遍性。昌黎、嘉峪关台8 h周期成分显著,但崇明台没有明显的8 h周期成分(仅在纵坐标刻度取对数时才显示8 h周期成分,不明显)。从应用1

天数据计算的频谱成分(图 2、图 3)看, 8 h 周期成分在 5 个台均出现, 在图中属于最强的周期成分. 由此看来 8 h 周期成分也属于广域性、普遍性出现的周期成分, 不过比半日波、全日波成分弱.

需要说明的是, 图 4 中由于半日波、全日波周期很强, 其它周期成分被压制掉了, 并不是没有其它周期成分.

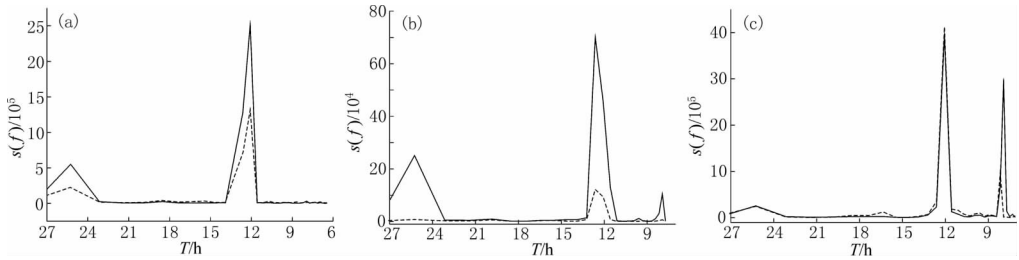


图 4 1 个月时间地电场小时值的频谱图(实线表示 NS 分量; 虚线表示 EW 分量)
(a) 2002 年 6 月崇明电场频谱; (b) 2003 年 5 月昌黎电场频谱; (c) 2004 年 8 月嘉峪关电场频谱

3 地电暴变化

地电暴和地磁暴一样, 与太阳活动引起的电离层扰动有密切关系. 地磁暴是一种剧烈的全球性扰动变化(徐文耀等, 2006), 包含多种暴时变化、脉动等不规则扰动. 根据电磁场传播理论, 地电暴与地磁暴是同源的, 也应是全球性的剧烈扰动. 以往关于地电暴的研究报道较少.

图 5 是 2005 年 5 月 15 日 3 小时磁情指数 $k=8$ 磁暴期间, 昌黎地磁、地电场和嘉峪关地电场的分钟值曲线. 由图可见, 与磁暴初相同时出现了持续约 4 个小时的地电暴初相, 紧接初相之后随磁暴主相开始电暴主相开始大幅度变化, 电暴主相幅度最大的时段对应磁暴主相形成过程中磁场变化最快的时段. 在磁暴恢复相开始时, 电暴开始恢复. 嘉峪关台与昌黎台纬度基本相同、经度相差约 21° , 电暴开始至恢复以及高频扰动是同步的, 不同于杜学彬等^①指出的这两个台大地电场日变化波峰、波谷出现时间存在与当地太阳时有关的时间差. 地电暴与磁暴的不同之处是整个地电暴期间伴随剧烈、比磁场短周期成分更丰富的大地电场短周期起伏变化; 另一个不同之处是嘉峪关台电暴幅度比昌黎台电暴幅度大得多. 在对两个台的地电场 NS 分量和 EW 分量观测数据进行谱分析的同时, 为了与磁场对比分析, 对这两个台磁场观测数据同时进行了谱估计. 其中嘉峪关为地磁总场 F (该台总场 F 与 X 分量场强基本接近)、昌黎为地磁 X 分量和 Y 分量观测数据.

图 6 给出了两个台电暴、磁暴的谱估计结果. 在第一周期段中, 两个台电场、磁场谱值主要集中在 4 h 以上周期成分, 其中约 8 h 周期成分最显著, 与大地电场日变化显著周期吻合. 昌黎台电场 NS 分量的谱值远大于 EW 分量, 磁场 X 分量与磁场 Y 分量的谱值相差不大; 嘉峪关台电场两个分量的谱值较接近. 在第二周期段内, 电场、磁场的主要周期成分集中在相对长周期部分, 两个台磁场谱值随周期减小变化趋势相同, 但电场变化趋势差异大. 其次, 嘉峪关台两个电场分量变化相同、昌黎台电场 NS 分量谱值比 EW 分量谱

① 杜学彬, 叶青, 李宁. 2007. 地电场日变化研究.

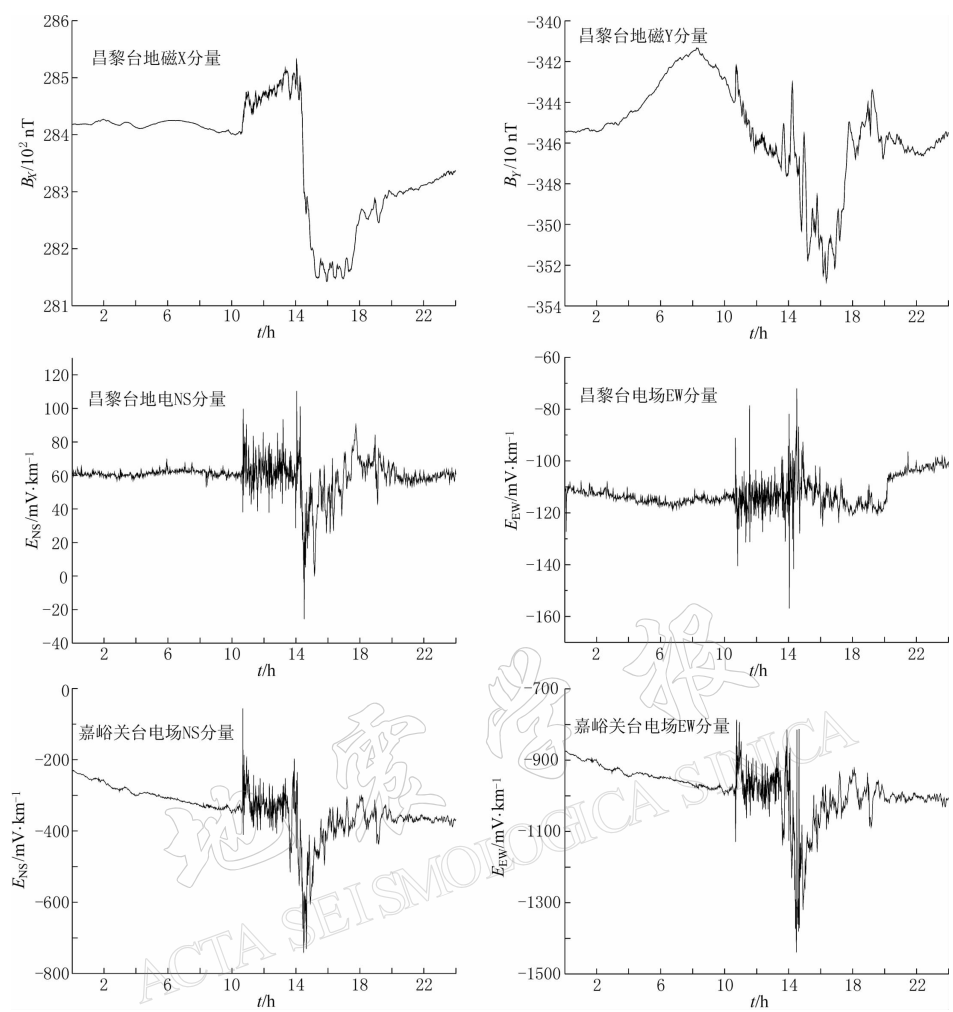


图 5 2005 年 5 月 15 日地磁暴和地电暴图

值大得多. 第三周期段中电场、磁场的高频成分十分丰富, 两个台磁场高频成分比较对应, 但电场高频成分不对应, 即使同一台站两个分量其高频成分也不对应. 同时, 3 个周期段中嘉峪关台电场谱值大于昌黎台电场谱值约 2 个数量级.

另外, 注意到 3 个周期段中电场谱值要大于图 3 所示的日变化谱值约 3 个数量级, 说明电暴时电场强度比平时大得多.

4 讨论

4.1 地电场日变化的主要谱成分解释

上述 7 个地电场台站位于中、低纬度地区, 根据本文对大地电场日变化频谱分析总结的中、低纬度频谱特征为: 日变化以 12 h, 24~25 h 和 8 h 为中心的周期成分最强, 几小时、几分钟的短周期成分也很清晰. 其中 12 h 的半日波成分最强, 24~25 h 的全日波和 8 h 周期成分次之. 据前苏联学者 Краев(1954)的研究, 大地电场日变化的幅度不是恒定的,

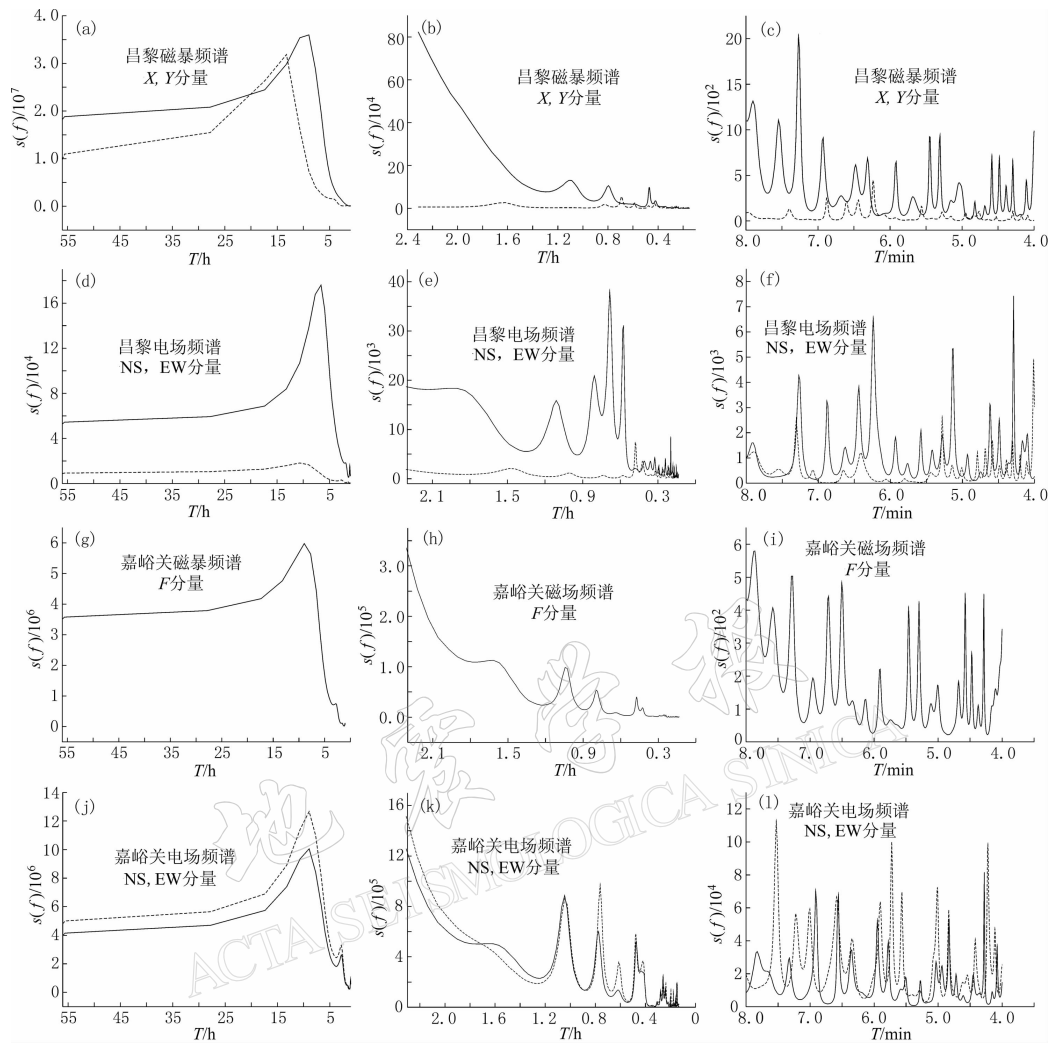


图 6 2005 年 5 月 15 日 吕 黎 和 嘉 峪 关 台 地 磁 暴、地 电 暴 频 谱 图

实线表示磁场 F , X 分量或电场 NS 分量; 虚线表示磁场 Y 分量或电场 EW 分量. (a)、(d)、(g)、(j) 周期段为 56~1 h; (b)、(e)、(h)、(k) 周期段为 2.22~0.14 h; (c)、(f)、(i)、(l) 周期段为 8~2 min

电场分量绝大部分是两次起伏, 两次起伏的相位比其它起伏的相位稳定. 杜学彬等^①研究了我国大陆地区 21 个地电场台站记录的大地电场日变化^②, 认为绝大多数日变化主要表现为 2 峰 2 谷的波形, 有时也出现 1 峰 1 谷波形等多样性. 此结果与 Краев(1950)的研究吻合. 从日变化频谱看, 12 h 的半日波成分最强且在不同的年份和月份、经纬度差异大的台站上出现, 显然是大地电场日变化的普遍性特征. 12 h 的周期成分正是日变化 2 峰 2 谷波形的谱特征. 根据 O. Gish 编制的 1936 年世界时 18 h 全球大地电流分布图(孙正江, 王华俊, 1990), 北半球有 8 个电流涡旋场, 中低纬度的 4 个涡旋中心在 30°附近, 高纬度的 4 个中心接近 70°附近. 这些涡旋电流场基本上按地理经度等间隔分布. 涡旋电流系的位置固

① 杜学彬, 叶青, 李宁, 等. 2006. 地球电场变化的基本要素研究结题报告.
② 杜学彬, 叶青, 李宁. 2007. 地电场日变化研究.

定,白天电流强、夜间电流弱.地球自转一周,各涡旋电流场的电流强、弱交替一次,白天两个强电流涡旋场、夜间两个弱电流涡旋场引起地电场经历两次起伏,所以产生大地电场日变化的显著半日波周期成分.据杜学彬等^①,大地电场日变化的峰—峰幅度最大的时间集中在当地太阳时的中午,这正好说明白天涡旋电流场强导致了以 12 h 为中心周期的大地电场日变化.大地电场谱成分中 24~25 h 周期也是普遍存在强周期成分,24 h 是太阳日周期,25 h 是太阴日周期(徐文耀,2003),这说明 24~25 h 的周期成分与大阳、太阴周期活动有关.地球自传一周,太阳风压缩地球向阳一面的磁层空间,而拓展背着太阳一面的磁层空间,引起 24 h 周期的大地电场变化.太阴活动周期约为 25 h,月球距离地球近,对地球产生潮汐引力作用,太阴活动引起的海潮、固体潮已被精确记录到,这种太阴活动引起的地球潮汐现象可能引起大地电场日变化.目前,关于电场日变化中 8 h 中心周期的产生原因还不清楚,尚需进一步研究.

4.2 地电暴主要谱成分解释

根据上述分析,2005 年 5 月 15 日的地电暴谱系结构有 3 个可识别的特点:① 昌黎、嘉峪关两个台记录的地电暴,在较长周期部分(大约 20 min 以上)电场的谱系结构随周期减小的变化趋势基本相同;② 电暴时,在整个可分析的频段内其谱值要高于日变化谱值约 2~3 个数量级;③ 昌黎、嘉峪关台地理纬度接近但经度相差约 21°,在这样大的空间尺度上电暴初相、主相开始的时间同步,同时与地磁暴开始时间同步.这些特点不同于电场日变化,说明产生电暴的机制与日变化不同.据杜学彬等^①的研究,大地电场高频扰动或脉动等快变化与地磁场短周期扰动同时发生,既是磁场扰动幅度不大但高频成分丰富,地电场也出现丰富的几毫伏/千米至十几毫伏/千米幅度或更大幅度的高频成分,并且这类扰动在大区域同时出现.上述地电暴、地磁暴以及地电场快变化、磁场短周期成分的特点证明了其场源远离观测点(场点),来自于太阳活动引起的固体地球外部的空间电流体系活动.这种电、磁现象可以应用电磁波传播理论解释.电暴时电场谱值高于日变化谱值约 2~3 个数量级,电磁辐射能量非常强,也说明了引起电暴的原因不同于引起日变化的原因.

据杜学彬等^②,嘉峪关、昌黎、宝坻台 3 个纬度近于相同.从这 3 个台浅层电测深结果看,昌黎台在半供电极距 $\overline{AB}/2=1\ 000\text{ m}$ 以内为 A 型电性结构,100 m 以内视电阻率 ρ_s 约 40~100 $\Omega \cdot \text{m}$;宝坻台 1 000 m 以内也为 A 型结构,100 m 以内 ρ_s 约 30~50 $\Omega \cdot \text{m}$;嘉峪关台 1 000 m 以内为 KH 型结构,100 m 以内 ρ_s 约 100~400 $\Omega \cdot \text{m}$.从上述情况可知,大地电场日变化谱值由大到小为嘉峪关、昌黎、宝坻台.同样嘉峪关台地电暴谱值比昌黎台大,说明台址浅层电阻率与地电场谱值大小的关系密切.

5 结论

1) 大地电场日变化主要周期成分以 12 h, 24~25 h 和 8 h 为中心周期,这些周期成分是我国大陆大地电场普遍存在的主要周期成分.其中 12 h 的半日波成分最强,其次是 24~25 h 的全日波和 8 h 周期成分.还存在短周期成分,但比上述周期成分强度弱.日变化主要周期成分是地球自传、太阳风、太阴活动引起地面电流体系强度发生昼夜交替变化引

① 杜学彬,叶青,李宁,等.2006.地球电场变化的基本要素研究结题报告.

② 杜学彬,叶青,李宁.2006.地电场日变化研究.

起的。

2) 地电暴以及大地电场快变化是大尺度空间同时发生的电磁现象, 约 20 min 以上的周期成分最强。总的看来, 各周期成分比日变化谱值大 2~3 个数量级, 可能是太阳活动引起固体地球外部的空间电流体系强烈活动辐射出的高能量电磁场所致。

3) 大地电场日变化、地电暴以及电场快变化成分的谱值大小与观测台台址的浅层电阻率有关, 电阻率越高, 大地电场各种周期成分谱值越大。

参 考 文 献

- 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 1985. 地球物理学基础[M]. 北京: 科学出版社: 447.
- 韩大字. 1987. 滑动 AR 谱分析与地震信息处理[J]. 地震学报, 9(4): 427-432.
- 宋治平, 梅世容, 武安绪, 等. 1997. 巨震前后地震活动度的最大熵谱特征[J]. 地震学报, 19(1): 7-12.
- 孙正江, 王华俊. 1984. 地电概论[M]. 北京: 地震出版社: 308.
- 王世一. 1997. 数字信号处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社: 274-364.
- 徐伯勋, 白旭滨. 1990. 最大熵谱分析在油气检测中的应用[J]. 石油物探, 29(2): 1-12.
- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社: 448.
- 徐文耀, Henri-Claud Nataf, 魏自刚, 等. 2006. 地磁场长期变化速率 30 年周期[J]. 地球物理学报, 49(5): 1 329-1 338.
- 中国科学院国家天文台太阳活动预报中心. 2005. 历史数据查阅(2000—2005 年)[EB/OL]// 历史数据. [2005-06-08]. <http://rwcc.bao.ac.cn/history>.
- Краев А. И. 1950. 中央地质部编译室译. 1954. 地电原理(上册)[M]. 北京: 地质出版社: 383.
- Fougere P F, Zawalik E, Radoske H R. 1976. Spontaneous line splitting in maximum entropy power spectral analysis [J]. *Phys Earth Planet Interi*, 12: 201-207.

SPECTRUM CHARACTERISTICS OF GEOELE- CTRIC FIELD VARIATION

Ye Qing¹⁾ Du Xuebin²⁾ Zhou Kechang¹⁾ Li Ning²⁾ Ma Zhanhu²⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100036, China

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

Abstract: The spectrum characteristics of geoelectric diurnal variation and geoelectric storm have been identified by maximum entropy method, based on geoelectric data from seven stations in the Chinese mainland, including Jiayuguan, Changli and Chongming. The study shows that, in geoelectric diurnal variation, the amplitude of the 12 h semidiurnal wave is the largest, followed in turn by the 24~25 h diurnal wave and the 8 h periodic wave; Geoelectric storm usually occurs in a large-scale space, whose spectrum values are higher than those of geoelectric diurnal variation by 2~3 orders of magnitude. A preliminary interpretation is presented for the generative mechanism of predominant waves in geoelectric field variation.

Key words: geoelectric field; period; maximum entropy; diurnal variation; geoelectric storm