

王丽, 杜学彬, 武震, 章鑫, 刘君, 崔腾发. 2015. 区域地电观测网地电场日变化模型研究. 地震学报, 37(5): 830-841.
doi:10.11939/jass.2015.05.011.

Wang L, Du X B, Wu Z, Zhang X, Liu J, Cui T F. 2015. Daily variation model of the geo-electric field based on the geo-electric data from the regional geo-electric observation networks. *Acta Seismologica Sinica*, 37(5): 830-841. doi:10.11939/jass.2015.05.011.

区域地电观测网地电场日变化模型研究^{*}

王丽¹⁾ 杜学彬^{1,2),*} 武震^{1,2)} 章鑫¹⁾
刘君^{1,2)} 崔腾发^{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 应用泰勒多项式和曲面样条函数法建立了我国地电场观测台网中华东、华北两个区域台网的地电场日变化($K_p \leqslant 5$)模型, 并对拟合结果进行了对比分析。结果表明: ① 尽管地电场变化复杂, 但用这两种方法建立的日变化模型相当吻合, 模型曲线随时间的变化符合样本曲线随时间的变化; ② 用模型曲线可以描述其它年份同农历日期、同等磁情时实测的地电场日变化; ③ 用模型曲线描述实测地电场日变化时, 低磁情时得出的结果要优于高磁情时的结果; ④ 用多日样本曲线得到的模型曲线更能清晰地展示出地电场日变化的两次起伏波形、幅度以及极值集中在午前午后等变化特点。今后建立全国各区域台网不同磁情、不同农历日期的地电场日变化模型可定量评价区域台网的地电场观测资料的质量, 同时根据该模型能够分离出地电场的非正常变化, 进而研判真实的异常, 以服务于地震等灾害事件的预测以及地球电磁环境变化的监测等方面。

关键词 地电场 地电场日变化 泰勒多项式模型 曲面样条函数模型

doi:10.11939/jass.2015.05.011 中图分类号: P315.72⁺² 文献标志码: A

Daily variation model of the geo-electric field based on the geo-electric data from the regional geo-electric observation networks

Wang Li¹⁾ Du Xuebin^{1,2),*} Wu Zhen^{1,2)} Zhang Xin¹⁾ Liu Jun^{1,2)} Cui Tengfa^{1,2)}

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

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

Abstract: The planar and time-varying models (geomagnetic index $K_p \leqslant 5$) of the daily variation of the geo-electric field in two regional geo-electric networks in East China and North China are built up based on the Taylor polynomial and surface spline function methods, respectively. Then the fitting results are compared and analyzed. The results show that although the geo-electric field variation is more complex, the models of the daily variation fitted by the two

* 基金项目 国家自然科学基金项目(41374080)资助。

收稿日期 2015-01-07 收到初稿, 2015-05-18 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: duxb@163.com

methods are identical to each other, and the two model curves are consistent with the measured sample curves with the variation of time. The two model curves could be used to describe the measured daily variation on the same lunar date in other years with the similar geomagnetic index K_p . The daily variation results based on the two models on the condition of a low geomagnetic index are better than that on a high geomagnetic index. The average model curves based on multi-day sample curves more clearly show the daily variation features of geo-electric field such as the twice fluctuation waveform in some day and its amplitude and the extreme value concentrating on before and after noon. It is important to establish the daily variation models of geo-electric field for the different lunar date in the different geomagnetic indices in each regional network. The models can be used to quantitatively evaluate the quality of observation data of regional geo-electric field networks, and the geo-electric field anomaly measured by the networks can be picked up based on these models, which can be applied to prediction of disasters like earthquakes and monitoring the changes in the electromagnetic environment.

Key words: geo-electric field; geo-electric daily variation; Taylor polynomial model; surface spline function model

引言

地球电场包括大地电场和自然电场。大地电场在全球或大区域范围有变化波形的相似性以及快变化成分的同步性(准均匀场),其与变化地磁场具有相同的场源,均由固体地球外部的空间电流体系对地球介质电磁感应所引起。大地电场变化分为静日变化和扰日变化,其中扰日变化包括高频地电变化、地电脉动、湾扰和地电暴(在地磁暴期间记录的地电场变化)等。自然电场起因于地下介质中的某些物理、化学作用所引起的电荷运动和分布。与大地电场相比,自然电场变化主要表现为局部区域和时间上相对稳定的变化,为非均匀场。地电场变化既受场源控制又受地下局部介质电性结构的影响而表现出局部差异,其中地电场日变化是每日出现的变化成分(克拉耶夫,1954;曾融生,1957;孙正江,王华俊,1984;傅承义等,1985;李金铭,2005)。经过长期努力,人们关于地电场随时间变化的研究取得了有益进展,但目前研究工作还主要集中在认识地电场变化的波形和周期特征等方面(杜学彬等,2007;叶青等,2007;谭大诚等,2010,2011;崔腾发等,2013),尚未像地磁场那样(安振昌,谭东海,1994;徐文耀,2002,2003;徐文耀等,2008;刘辉等,2009;柳士俊等,2011)用变化模型描述地电场的变化规律。

我国现运行观测有约 120 个固定位置的地电场台站,本文尝试建立地电场日变化(随时间变化)模型,期望今后能基于该模型实现 3 个目的:①进一步认识正常的地电场日变化规律;②应用其评价地电场台网的观测数据质量;③从正常背景变化中分离出非正常变化,其中的异常变化可服务于地震等灾害事件预测以及地球电磁环境变化监测等方面。在地电场观测中,除了地震、火山等自然事件引起异常变化外,场地环境、台站测量系统(包括仪器、测量电极和线路等)故障也是造成观测数据出现非正常变化的原因。例如,图 1a 为甘肃天水台 NS 测道测量的 2007 年 9 月 10 日地电场分钟值曲线,图中一天两次起伏的地电场日变化波形、峰-谷极值幅度、周期以及主要极值集中在午前午后等特点和场强均

符合人们关于地电场日变化的认识(杜学彬等, 2007; 叶青等, 2007; 崔腾发等, 2013; 谭大诚等, 2014), 似乎其变化是正常的。图 1b 为 2007 年 8 月 18 日该测道分钟值曲线, 其与图 1a 中所谓的正常变化却完全不同。该图中出现了上升漂移现象和同场地的电阻率观测供电引起的突跳变化(非正常变化), 其次地电场场强与图 1a 差异也较大。如果图 1a 的变化是正常的, 则可用类似该图数据建立日变化模型, 由该模型曲线描述图 1b 的变化, 可以得到图 1b 偏离模型的差异程度, 进而评价图 1b 的数据质量; 同时剔除图 1b 中的地电阻率供电干扰后得到的偏离模型的差异, 可分析图 1b 是否出现了非正常变化, 并对出现的非正常变化利用地电场多极距观测(Varotsos, Alexopoulos, 1984a, b; 李伟等, 2014; 马钦忠等, 2014)、日变化“波形畸变”(李宁等, 2007)等方法, 对台站观测环境、台站测量系统运行情况等进行研判, 看其是否出现了与地震等事件有关的异常变化, 即分离异常变化。

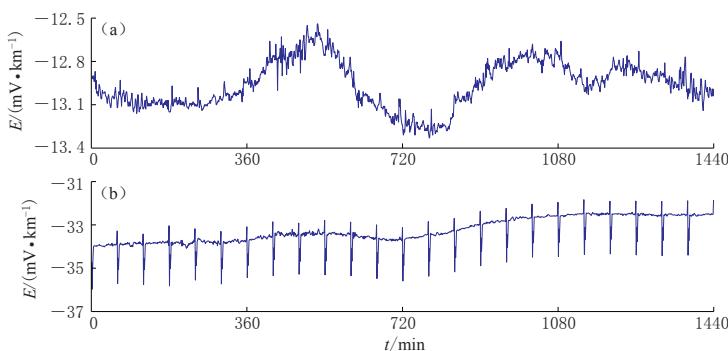


图 1 天水台地电场 NS 测道 2007 年 9 月 10 日(a)和 2007 年 8 月 18 日(b)的分钟值曲线

Fig. 1 The minute-value curves of geo-electric field in channel NS at the station Tianshui on September 10, 2007 (a) and on August 18, 2007 (b)

1 原理和方法

1.1 建模原理

地电场观测台站在地表水平布设 NS、EW 2 个正交观测方向和 1 个斜方向, 每个观测方向布设长、短极距测道(共 6 个多极距测道); 测量仪器频带为 0—0.005 Hz, 进行 24 小时连续观测, 仪器分辨率为 $10 \mu\text{V}$, 数据产出不低于 1 次/(分钟·测道)。中国地震局先后颁布了地电场台站环境保护、台站建设、观测方法和观测仪器入网等国家/行业标准、规范(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2004; 中国地震局, 2006, 2008); 全国地电台网技术管理部门制定了管理和监督台站执行标准的技术规定, 并对仪器、线路、电极和观测环境等进行日常监控。这些规范、标准和技术管理措施强化了台网产出高质量的观测数据, 能测定变化幅度大于 0.5 mV/km 的地电场变化。

我国观测地电场水平分量, 还不能使用地磁学中的球谐函数法等三维模型, 故采用泰勒多项式和曲面样条函数法, 按地电场单分量 E_x (北分量)、 E_y (东分量)进行建模和描述地电场日变化, 所建模型为选定区域内若干台站单分量随时间变化的空间二维(平面)模型。地电场日变化明显响应太阳、月球对地球的潮汐作用(黄清华, 刘涛, 2006; 谭大诚等, 2010; 崔腾发等, 2013), 主要的日变化成分按其幅度大小依次为半日波(主太阴半日波 M_2 波周期和主太阳 S_2 波周期)、全日波(太阳日周期); 其次, 日变化还存在逐日相位差和半

月潮的现象。同时, 磁情天气也影响地电场变化。因此, 本文按一年中农历日期的地电场样本曲线建模, 再用模型曲线描述不同年份或同年份中同农历日期和同等磁情的地电场日变化。

需要说明的是, 地电场变化对地下介质电导率结构响应敏感, 不同区域的台站或同区域的不同台站以及同台站不同测道观测的场强往往存在差异, 故用若干台站某分量(某测道的测量数据)建立的日变化模型, 只适用于描述该台站该分量在同农历日期和同等磁情时的地电场日变化。

1.2 泰勒多项式法

安振昌和谭东海(1994)应用泰勒多项式法建立了中国大陆地区的地球主磁场模型和东亚地磁场模型, 柳士俊等(2011)应用该方法建立了区域地磁场模型, 本文应用该方法建立地电场日变化模型。泰勒多项式的基本公式为

$$F = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^n A_{nm} (\varphi - \varphi_0)^{n-m} (\lambda - \lambda_0)^m, \quad (1)$$

式中: F 为测点(台站)的地电场某分量测值; φ 和 λ 分别为测点的地理纬度和经度; φ_0 和 λ_0 分别为泰勒多项式模型展开原点的纬度和经度, 展开原点一般选在区域中心; N 为多项式的截断阶数, 共有 $(N+1)(N+2)/2$ 个模型系数; A_{nm} 为多项式模型系数, 通过测量点测值及 φ 和 λ 用最小二乘法求得。

1.3 曲面样条函数法

安振昌等(1982)应用曲面样条函数法建立了局部地区地磁场的长期变化模型, 刘辉等(2009)应用该方法建立了海洋局部地磁场模型。曲面样条函数的基本公式为

$$w(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + \sum_{i=1}^n F_i r_i^2 \ln(r_i^2 + \epsilon), \quad (2)$$

式中: $w(x, y)$ 为地电场某分量测值; a_0 , a_1 , a_2 和 F_i 为待定系数; x 和 y 分别为台站纬度和经度; $r_i^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2$, x_0 和 y_0 分别为所选区域中心点的纬度和经度; ϵ 为控制曲面曲率变化的小量, 可看作经验性调节参数, 视实际情况适当选取, 当曲面曲率变化较大时, ϵ 要取得小些, 反之, 则取得大些, 一般对平坦曲面取 $\epsilon = 1 - 10^{-2}$ 。设有 N 个测点的地电场同一分量的观测数据 w_i , 其所对应的测点经纬度坐标为 (x_i, y_i) , 则建立曲面样条函数模型的过程即为用最小二乘法确定待定系数的过程。

2 地电场日变化模型拟合和描述

2.1 观测数据

我国地电场台站空间分布不均匀, 主要集中在地震系统俗称的“南北地震带”、大华北和东部沿海地区。由于台站长期定点观测, 其观测环境和测量系统(电极、外线路、仪器等)的长期稳定性会影响观测数据质量, 因此必须首先对观测数据进行筛选。筛选的原则为: ① 被选取数据的台站空间分布尽可能均匀, 观测数据质量须合格(往往一个区域中有个别台站观测数据质量不高); ② 考虑到地电场日变化对潮汐响应的逐日变化, 需选取相同农历日期或前后相差一天的各台站观测数据。

本文首先选取北京延庆、通州, 天津宝坻、徐庄子, 河北昌黎、大柏舍等 6 个台站为 I 号区域(图 2a), 选取江苏高邮、新沂、南京、海安和山东郯城、陵阳等 6 个台站为 II 号区域(图 2b), 以及两个区域 2010—2014 年 NS 测道的观测数据; 然后, 用所选观测数据作为拟

合模型的样本数据及模型描述的实测数据。磁情指数分别取 $K_p=1, 2, K_p=3, 4$ 和 $K_p=5$ 等 3 种情况。

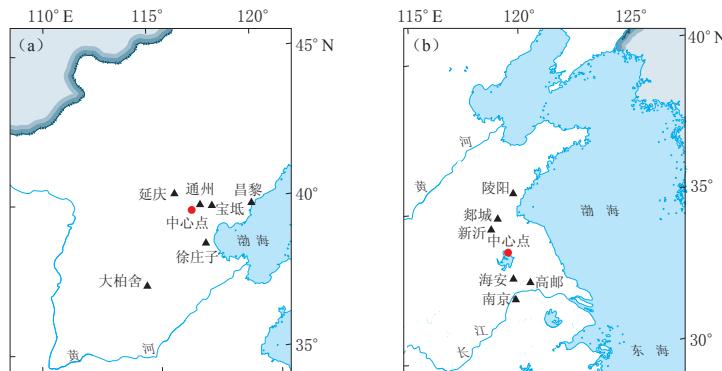


图 2 I 号区域(a)和 II 号区域(b)地电场台站分布

Fig. 2 Distribution of geo-electric field stations in region I (a) and II (b)

目前我国数字化地电场观测技术仍在发展中, 台站测量电极、外线路和测量仪器等测量系统的长期稳定性仍需进一步发展和完善。台站观测数据有时会出现线性漂移或/和更换电极等出现的每千米若干毫伏的数据阶跃和台阶变化等。为此需先对观测数据进行预处理, 内容包括地电场观测数据时间序列去倾和中心化(减去平均值)处理, 研究对象为地电场日变化的波形、幅度、周期和相位等特征。

2.2 地电场日变化模型

分别采用多天和 1 天观测数据作为样本曲线拟合建立模型。其中用多天观测数据拟合的模型系数为平均模型系数, 即各天观测数据拟合的模型系数的平均值, 所建模型称为平均系数模型。

2.2.1 平均系数模型

1) $K_p=3, 4$ 时的日变化模型。用 2012 年 4 月 19—20 日(农历 3 月 29—30 日, $K_p=3$) I 号区域 6 个台站 NS 测道的观测数据分钟值, 拟合出 6 个台站的泰勒多项式和曲面样条函数模型(计算出的模型系数数量庞大, 故文中省略模型系数表, 下同)。图 3 给出了其中河北大柏舍台和北京延庆台 NS 测道的两条模型曲线和样本曲线。可以看出: ① 泰勒多项式模型曲线与曲面样条函数模型曲线完全一致; ② 泰勒多项式模型曲线与样本曲线随时间的变化很吻合, 模型展示的日变化波形更清晰, 呈现出“两次起伏”波形, 极值主要集中在午前午后; ③ 模型的场强值与实测值及日变化峰-谷幅度相吻合。大柏舍台泰勒多项式模型和曲面样条函数模型与 2 天样本数据的差值绝对均值分别为 0.4670 和 0.4723 mV/km, 延庆台分别为 0.1231 和 0.1213 mV/km, 说明模型曲线与样本曲线的误差较小, 大致为日变化峰-谷幅度的 6%。两条模型曲线代表了两个台站在这 2 天的地电场日变化。两个台站差值平均值大小不同, 其原因是各台站背景噪声不同, 故各台站之间的差值绝对均值不具有可比性(下同)。

2) $K_p=1, 2$ 时的日变化模型。图 4 给出了 2013 年 3 月 7—8 日(农历 1 月 26—27 日, $K_p=1$) I 号区域 6 个台站中的河北大柏舍台和北京延庆台 NS 测道的地电场分钟值日变化模型曲线和 2 天的样本曲线。由于泰勒多项式模型曲线与曲面样条函数模型曲线几乎一

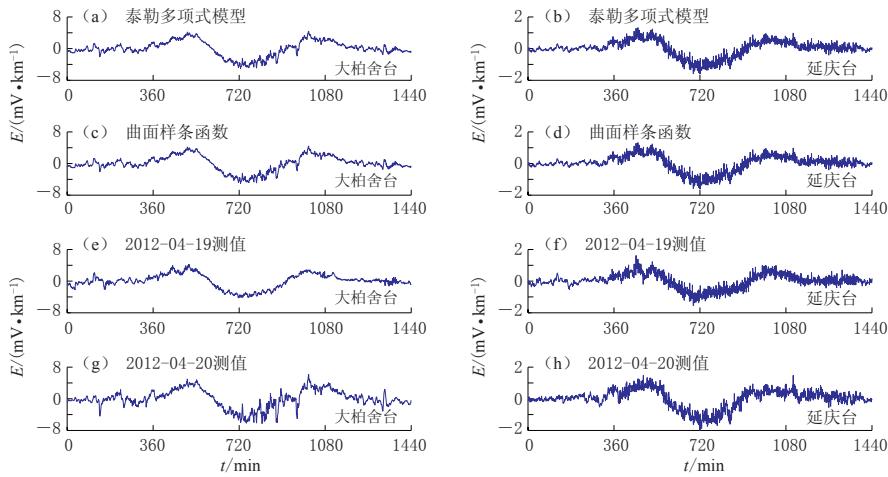


图3 大柏舍台和延庆台NS测道2012年4月19—20日(农历3月29—30日, $K_p=3$)的地电场日变化模型曲线和实测样本分钟值曲线

(a, c) 大柏舍台泰勒多项式和曲面样条函数模型曲线; (e, g) 大柏舍台实测样本曲线;
(b, d) 延庆台泰勒多项式和曲面样条函数模型曲线; (f, h) 延庆台实测样本曲线

Fig. 3 The minute-value curves of geo-electric field model and measured sample in channel NS at the stations Daboshe and Yanqing on April 19 and 20, 2012 (on Lunar March 29 and 30, $K_p=3$)
(a) and (c) are the Taylor polynomial and surface spline model curves of the station Daboshe; (b) and (d) are the Taylor polynomial and surface spline model curves of the station Yanqing; (e, g) and (f, h) are the measured sample curves of the stations Daboshe and Yanqing, respectively

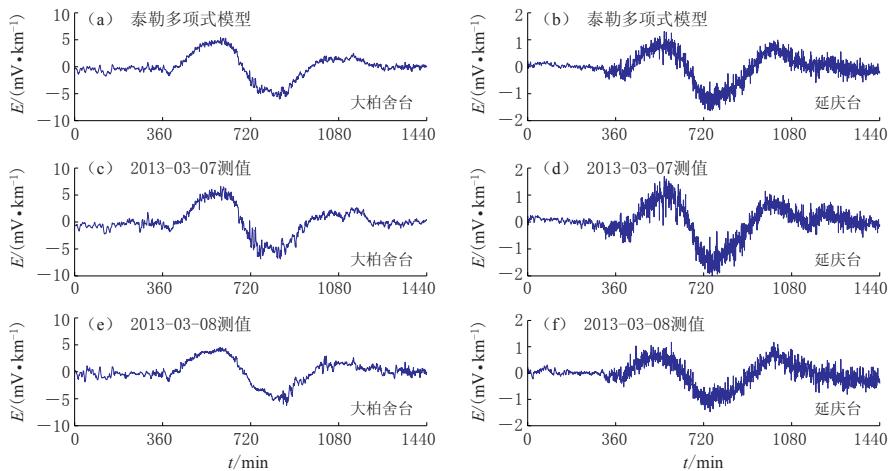


图4 大柏舍台和延庆台NS测道2013年3月7—8日(农历1月26—27日, $K_p=1$)的地电场日变化模型曲线和实测样本分钟值曲线

(a, b) 大柏舍台和延庆台泰勒多项式模型曲线; (c, e) 大柏舍台实测样本曲线; (d, f) 延庆台实测样本曲线
Fig. 4 The minute-value curves of geo-electric field model and measured sample in channel NS at the stations Daboshe and Yanqing on March 7 and 8, 2013 (on Lunar January 26 and 27, $K_p=1$)

(a) and (b) are the Taylor polynomial model curves of the stations Daboshe and Yanqing, respectively;
(c, e) and (d, f) are the measured sample curves of the stations Daboshe and Yanqing, respectively

致,故在图4中仅给出泰勒多项式模型曲线(下同).可以看出,泰勒多项式模型曲线与两个台站样本曲线的波形变化和测值大小均吻合.大柏舍台模型曲线与两天样本曲线的差值

绝对均值分别为 0.3843 和 0.3792 mV/km, 延庆台分别为 0.1251 和 0.1248 mV/km. 说明模型曲线代表了两个台站在这两天的地电场日变化.

3) $K_p=5$ 时的日变化模型. 图 5 给出了 2010 年 5 月 29—30 日(农历 4 月 16—17 日, $K_p=5$) I 号区域 6 个台站中的天津徐庄子台, 北京通州台、延庆台 NS 测道的地电场分钟值日变化模型曲线和 2 天实测样本曲线. 可以看出, 泰勒多项式拟合模型曲线与 3 个台站样本曲线的波形变化和场强值大小均吻合. 徐庄子台模型曲线与 2 天样本曲线的差值绝对均值分别为 0.1919 和 0.2021 mV/km, 通州台分别为 0.4685 和 0.4311 mV/km, 延庆台分别为 0.2574 和 0.2611 mV/km. 说明模型曲线代表了 3 个台站这两天的地电场日变化. 同时注意到, 延庆台在高磁情 $K_p=5$ 时(中常磁暴)模型曲线与样本曲线的差值绝对均值均大于 $K_p=1, 2$ 和 $K_p=3, 4$ 时的情况.

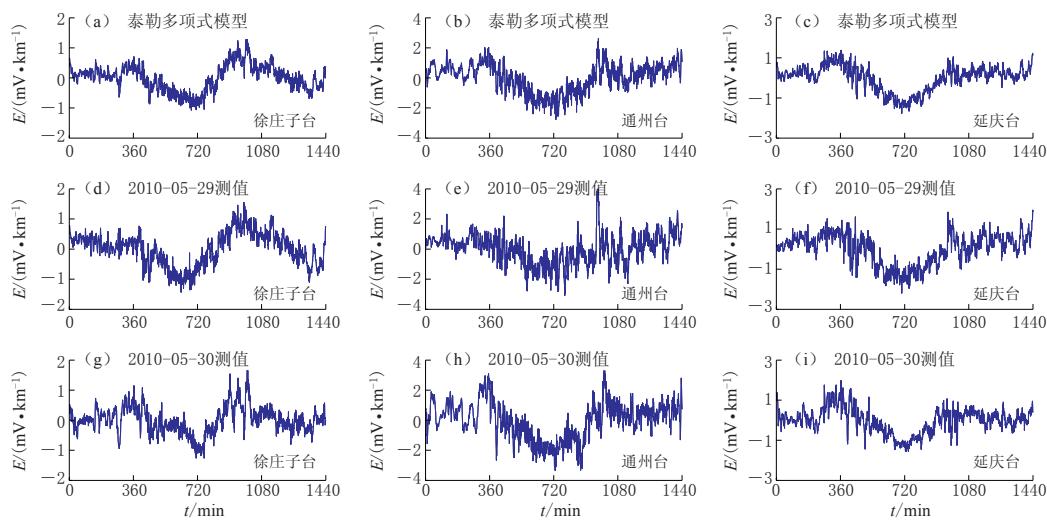


图 5 徐庄子台、通州台和延庆台 NS 测道 2010 年 5 月 29—30 日(农历 4 月 16—17 日,

$K_p=5$) 的地电场日变化模型曲线和实测样本分钟值曲线

(a, b, c) 徐庄子台、通州台和延庆台泰勒多项式模型曲线; (d, g) 徐庄子台实测样本曲线;

(e, h) 通州台实测样本曲线; (f, i) 延庆台实测样本曲线

Fig. 5 The minute-value curves of geo-electric field model and measured sample in channel NS at the stations Xuzhuangzi, Tongzhou and Yanqin on May 29 and 30, 2010 (on Lunar April 16 and 17, $K_p=5$)

(a), (b) and (c) are the Taylor polynomial model curves of the stations Xuzhuangzi, Tongzhou and Yanqin, respectively; (d, g), (e, h) and (f, i) are the measured sample curves of the three stations, respectively

2.2.2 模型描述

用两个区域的地电场 NS 测道分钟值曲线样本拟合泰勒多项式模型曲线和曲面样条函数模型曲线, 然后用模型曲线描述同等磁情、相同农历日期的实测曲线, 结果表明模型曲线与实测曲线的吻合度较高, 说明用地电场日变化模型曲线可以描述其它年份、相同农历日期和同等磁情的地电场日变化.

用 2012 年 4 月 19—20 日(农历 3 月 29—30 日, $K_p=3$) I 号区域中的大柏舍台(图 3a)和延庆台(图 3b)的泰勒多项式模型(NS 测道分钟值拟合的平均系数模型)描述 2013 年 5 月 8 日(农历 3 月 29 日, $K_p=3$)大柏舍台(图 6a)和延庆台(图 6b)NS 测道的地电场日变

化。可以看出, 2013年5月8日大柏舍台和延庆台实测地电场日变化与上述模型给出的日变化波形相当吻合, 其差值绝对均值分别为1.0526和0.3435 mV/km, 说明两台站两年内观测环境、电极等测量系统稳定性未发生明显改变。但毕竟图3模型曲线与图6曲线的测量时间相隔1年多, 还是存在观测环境和/或电极等测量系统的略微改变, 两台站差值绝对均值略大于图3中的误差。实际上, 分别比较图3中两台站样本曲线与图6a, b中被描述的曲线, 即可以看出地电场日变化和叠加在日变化上的高频次变化存在略微差异。

用2013年3月7—8日(农历1月26—27日, $K_p=1$)I号区域大柏舍台(图4a)和延庆台(图4b)的泰勒多项式模型(NS测道分钟值拟合的平均系数模型)描述2014年2月26日(农历1月27日, $K_p=1$)大柏舍台(图6c)和延庆台(图6d)NS测道的地电场日变化。可以看出, 2014年大柏舍台地电场日变化与上述模型给出的日变化相当吻合, 延庆台二者也吻合, 但实测曲线表现出比模型曲线更严重的地铁干扰。大柏舍台模型与实测数据的差值绝对均值为1.2877 mV/km, 延庆台为0.3311 mV/km。依然是大柏舍台的差值绝对均值较大, 但从整体来看, 用上述模型可以描述图6c, d中两个台站的地电场日变化。

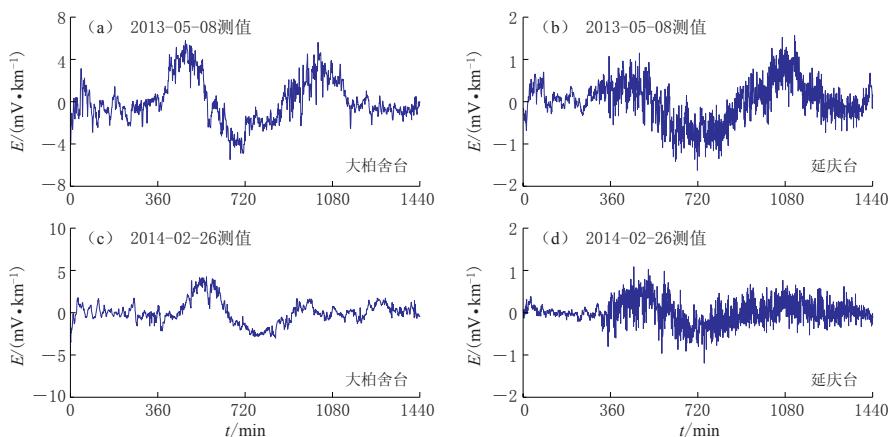


图6 大柏舍台和延庆台NS测道2013年5月8日(农历3月29日, $K_p=3$)和2014年2月26日(农历1月27日, $K_p=1$)被描述的实测分钟值曲线
(a, c) 大柏舍台被描述的实测曲线; (b, d) 延庆台被描述的实测曲线

Fig. 6 The described minute-value curves of geo-electric field in channel NS at the stations Daboshe and Yanqing on May 8, 2013 (on Lunar March 29, $K_p=3$) (upper) and on February 26, 2014 (on Lunar January 27, $K_p=1$) (lower)
(a, c) and (b, d) are the described curves of the stations Daboshe and Yanqing, respectively

选取2012年7月18日(农历5月30日, $K_p=1$)Ⅱ号区域6个台站的NS测道分钟值样本曲线拟合泰勒多项式模型和曲面样条函数模型(单日数据拟合的模型)曲线。用其中的高邮台和海安台泰勒多项式模型曲线(图7a, b)描述2010年7月11日、2011年6月30日和2014年6月26日(农历5月30日, $K_p=2$)两台站实测的地电场日变化曲线(共3天, 图7c—h)。可以看出, 两台站日变化模型曲线与实测曲线的波形变化、场强大小等均相当吻合, 且地电场变化的部分细结构也吻合。高邮台模型曲线与3天实测曲线的差值绝对均值分别为0.1969, 0.1684和0.2848 mV/km, 海安台分别为0.2108, 0.1849和0.3037 mV/km。说明模型曲线与实测曲线的误差非常小, 用模型描述不同年份(同等磁情、同农历日期)的

地电场日变化是可行的。这两个台站观测环境优越，其描述结果明显优于受到环境影响较多的北京延庆台等台站的结果。

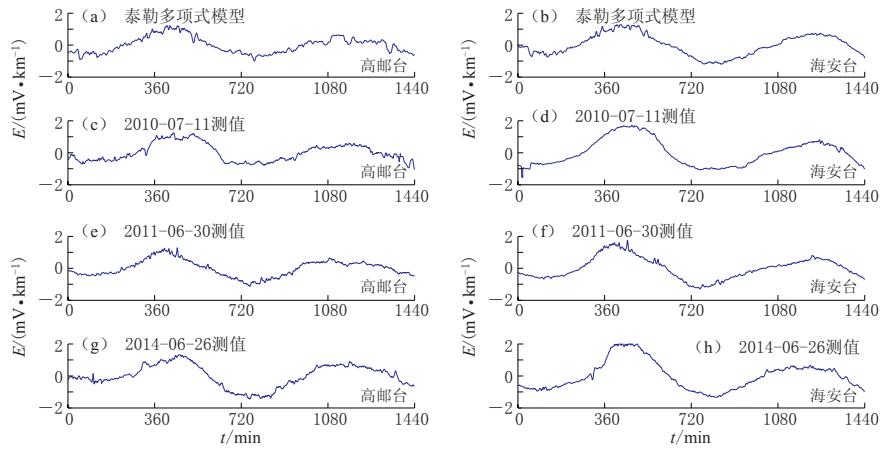


图 7 高邮台和海安台 NS 测道 2012 年 7 月 18 日(农历 5 月 30 日, $K_p=1$)泰勒多项式模型分钟值曲线及 2010 年 7 月 11 日、2011 年 6 月 30 日和 2014 年 6 月 26 日
(农历 5 月 30 日, $K_p=2$)被描述的实测分钟值曲线
(a, b) 高邮台和海安台泰勒多项式模型曲线; (c, e, g) 高邮台被描述的
实测曲线; (d, f, h) 海安台被描述的实测曲线

Fig. 7 The minute-value curves of geo-electric field based on Taylor polynomial model on July 18, 2012 (on Lunar May 30, $K_p=1$) and described curves in channel NS at the stations Gaoyou and Haian on 11 July 2010, 30 June 2011 and 26 June 2014 (on Lunar May 30, $K_p=2$)
(a) and (b) are the Taylor polynomial model curves of the stations Gaoyou and Haian, respectively;
(c, e, g) and (d, f, h) are the described curves of the stations Gaoyou and Haian, respectively

本文仅介绍了应用两个区域地电场台站 NS 测道观测数据建立的地电场日变化模型，并用该模型描述不同年份的同农历日期、同等磁情的地电场日变化结果。实际上，在研究过程中作者还应用这些台站 EW 测道的观测数据拟合了泰勒多项式和曲面样条函数模型曲线，并用于描述 EW 测道的地电场日变化，其结果与本文 NS 测道给出的结果类似；另外，用 2010 年 5 月 29—30 日(农历 4 月 16—17 日, $K_p=5$, 中常磁暴)徐庄子台(图 5a)、通州台(图 5b)和延庆台(图 5c)泰勒多项式模型曲线描述了 2013 年 5 月 25 日(农历 4 月 16 日, $K_p=5$)3 个台站的日变化曲线，其误差大于 $K_p \leq 4$ 的情况。其原因是由于这两次磁暴类型、起止时间和建模所用的样本曲线存在差异造成的。同时，作者也研究了其它日期、磁情条件下的地电场日变化模型，限于篇幅本文未出示图形结果。

3 讨论与结论

目前关于地电场日变化(随时间变化)的研究多集中在时间域的波形分析、频率域主要变化成分的频率(或周期)成分分析及其变化机理的研究等。本文引入泰勒多项式和曲面样条函数法建立不同磁情条件下的地电场日变化模型，两种方法建立的模型相当吻合，两类模型曲线随时间的变化几乎是一致的，模型曲线与样本曲线的误差较小(远小于日变化峰-谷幅度)。同时，模型曲线特别是平均系数模型曲线更清楚地展示了地电场日变化特点，如日变化波形、幅度、相位、主要为每天两次起伏的半日波变化及峰-谷极值主要集中在午前

午后等变化特点。用模型曲线描述不同年份同农历日期、同等磁情天气的实测曲线, 在低磁情($K_p \leq 4$)和正常观测条件下, 模型曲线与被描述的实测曲线之间的误差较小(远小于日变化峰-谷幅度)。上述结果表明, 用这两种方法可以建立低磁情条件下的地电场日变化模型, 并用以描述不同年份或同年份中同农历日期、同等磁情(低磁情)条件的实测地电场日变化。需要说明的是, 用这两种方法建立地电场日变化模型时, 需选择一个展开原点, 展开原点一般选在研究区域中心位置。展开原点经、纬度不同, 所得模型系数也不同, 但不影响结果。

我国地电场观测特别是数字化观测起步较晚, 只经历了10多年的时间, 大规模的台网观测只有7年时间。经过“九五”后期特别是“十五”期间的建设, 我国地电场台网已发展成为世界上最大规模、规范化观测的地电场台网, 但地电场测量系统的长期稳定性等还有待进一步发展和完善。同时由于台站地表观测环境的逐步恶化, 影响观测数据质量的因素较多, 加之地电场台网仅观测每千米若干毫伏的地电场变化, 所以亟需对地电场观测数据质量进行量化评价。本文对地电场日变化模型的研究虽然是初步的, 仅研究了华东、华北区域 $K_p=1, 2, K_p=3, 4$ 和 $K_p=5$ 时的地电场日变化模型, 但研究结果证明可以建立地电场日变化模型, 对 $K_p \leq 5$ (特别是 $K_p \leq 4$)时的地电场日变化进行模型化的定量描述。随着研究工作的逐步进展, 今后希望能建立全国地电场台网中每个台站各测道在各种磁情天气(低磁情指数)下的地电场日变化模型, 通过模型定量评价地电场观测数据质量的优劣。

另一方面, 国内外研究者作了大量与地震、火山发生相对应的地电场短临前兆现象的研究(Varotsos, Alexopoulos, 1984a, b; Zlotnicki *et al.*, 2001; 黄清华, 刘涛, 2006; 马钦忠等, 2009; 范莹莹等, 2010, 2013; 刘君等, 2011; 田山等, 2012), 但目前主要是从观测数据的图像分析方法来识别地电场日变化“波形畸变”以及叠加在日变化上的高频次脉冲变化和大幅度的自然电场变化等短临异常信息。本文研究结果表明可以对地电场特别是地电场日变化进行模型描述, 这样一方面可以更清晰地认识地电场日变化时空分布规律, 另一方面基于正常的地电场日变化模型也可以分离出非正常变化, 进而利用多极距观测原理、图像分析、多台对比等方法以及分析观测环境、台站测量系统运行等手段, 对出现非正常变化的台站研判其观测数据中出现的真实异常。

参 考 文 献

- 安振昌, 徐元芳, 夏国辉, 王月华. 1982. 表示局部地区地磁场及其长期变化分布的数学方法[J]. 地球物理学报, 25(增刊): 711–717.
- An Z C, Xu Y F, Xia G H, Wang Y H. 1982. Mathematical methods to express the distribution of the geomagnetic field and its secular variation in local area[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 25(Suppl): 711–717 (in Chinese).
- 安振昌, 谭东海. 1994. 东亚地磁场的 Taylor 多项式模型[J]. 地震地磁观测与研究, 15(6): 1–4.
- An Z C, Tan D H. 1994. Taylor polynomial model of the geomagnetic field over East Asia[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 15(6): 1–4 (in Chinese).
- 崔腾发, 杜学彬, 叶青, 陈军营, 王建军, 安张辉, 范莹莹, 刘君. 2013. 中国大陆经纬链地电场日变化[J]. 地球物理学报, 56(7): 2358–2368.
- Cui T F, Du X B, Ye Q, Chen J Y, Wang J J, An Z H, Fan Y Y, Liu J. 2013. The diurnal variation of geo-electric field along the longitude and latitude chains in China mainland[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(7): 2358–2368 (in Chinese).
- 杜学彬, 叶青, 赵杰, 王娜, 薛志明, 史红军, 马占虎, 李宁. 2007. 地电场日变化研究[J]. 地震, 27(增刊): 121–130.
- Du X B, Ye Q, Zhao J, Wang N, Xue Z M, Shi H J, Ma Z H, Li N. 2007. Study on geo-electric field daily variation[J].

- Earthquake*, **27**(Suppl): 121–130 (in Chinese).
- 范莹莹, 杜学彬, Zlotnicki J, 谭大诚, 刘君, 安张辉, 陈军营, 郑国磊, 谢滔. 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).
- 范莹莹, 安张辉, 陈军营, 刘君, 王建军, 崔腾发, 王丽. 2013. 岷县漳县 $M_{S}6.6$ 地震前平凉台地电场变化[J]. 地震工程学报, **35**(4): 827–834.
- Fan Y Y, An Z H, Chen J Y, Liu J, Wang J J, Cui T F, Wang L. 2013. The variation of geoelectrical field at Pingliang station, Gansu Province, before the Minxian–Zhangxian $M_{S}6.6$ earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(4): 827–834 (in Chinese).
- 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: 203–254.
- Fu C Y, Chen Y T, Qi G Z. 1985. *Geophysical Foundation*[M]. Beijing: Science Press: 203–254 (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 Niijima station[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **49**(6): 1745–1754 (in Chinese).
- 克拉耶夫. 1954. 地电原理[M]. 张可迁, 陈培光, 张志诚译. 北京: 地质出版社: 100–236.
- Kravtsov A P. 1954. *Ge-electrics Principle*[M]. Zhang K Q, Chen P G, Zhang Z C, Trans. Beijing: Geological Publishing House: 100–236 (in Chinese).
- 李金铭. 2005. 地电场与电法勘探[M]. 北京: 地质出版社: 36–54.
- Li J M. 2005. *Geoelectric Field and Electrical Exploration*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 36–54 (in Chinese).
- 李宁, 杜学彬, 谭大诚, 叶青, 陈军营. 2007. 松山观测台地震短临电磁现象[J]. 地震, **27**(增刊): 103–111.
- Li N, Du X B, Tan D C, Ye Q, Chen J Y. 2007. Imminent electro-magnetic phenomenon related to earthquakes recorded at the Songshan station[J]. *Earthquake*, **27**(Suppl): 103–111 (in Chinese).
- 李伟, 马钦忠, 王冠明. 2014. 地电场多极距观测的异常识别和分析[J]. 中国地震, **30**(1): 91–101.
- Li W, Ma Q Z, Wang G Y. 2014. Abnormal signal recognition by multi-dipole observation of geoelectric field[J]. *Earthquake Research in China*, **30**(1): 91–101 (in Chinese).
- 刘辉, 赵建虎, 李娟. 2009. 用曲面插值方法建立海洋局部地磁场模型[J]. 海洋测绘, **29**(3): 28–30.
- Liu H, Zhao J H, Li J. 2009. Establishment of oceanic local geomagnetic field model using surface interpolating[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, **29**(3): 28–30 (in Chinese).
- 刘君, 杜学彬, Zlotnicki J, 范莹莹, 安张辉, 解滔, 郑国磊, 谭大成, 陈军营. 2011. 几次大震前的地电场变化[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).
- 柳士俊, 周小刚, 孙涵, 安振昌. 2011. 用于区域地磁场模型计算的三维 Taylor 多项式方法[J]. 地球物理学进展, **26**(4): 1165–1174.
- Liu S J, Zhou X G, Sun H, An Z C. 2011. The three dimension Taylor polynomial method for the calculation of regional geomagnetic field model[J]. *Progress in Geophysics*, **26**(4): 1165–1174 (in Chinese).
- 马钦忠, 赵卫国, 张文平. 2009. 文县地电场震前异常变化及其在 2001 年昆仑山口西 $M_{S}8.1$ 地震预测研究中的应用[J]. 地震学报, **31**(6): 660–670.
- Ma Q Z, Zhao W G, Zhang W P. 2009. Abnormal variations of geoelectric field recorded at Wenxian station preceding earthquakes and their application to the prediction of the 2001 $M_{S}8.1$ Kunlun earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(6): 660–670 (in Chinese).
- 马钦忠, 李伟, 张继红, 郭玉贵, 方国庆. 2014. 与大电流信号有关的华北东部地区地电场空间变化特征的研究[J]. 地球物理学报, **57**(2): 518–530.
- Ma Q Z, Li W, Zhang J H, Guo Y G, Fang G Q. 2014. Study on the spatial variation characteristics of the geoelectric field signals recorded at the stations in the east Huabei area when a great current is injected[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **57**(2): 518–530 (in Chinese).

- 孙正江, 王华俊. 1984. 地电概论[M]. 北京: 地震出版社: 3-95.
- Sun Z J, Wang H J. 1984. *Introduction to Geo-electricity*[M]. Beijing: Seismological Press: 3-95 (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, 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).
- 田山, 张磊, 王建国, 徐学恭, 董洪军, 姚会琴. 2012. 汶川、玉树大地震前的地电场异常[J]. 地球物理学进展, **27**(3): 878-887.
- Tian S, Zhang L, Wang J G, Xu X G, Dong H J, Yao H Q. 2012. Geoelectric field anomaly before Wenchuan and Yushu earthquake[J]. *Progress in Geophysics*, **27**(3): 878-887 (in Chinese).
- 徐文耀. 2002. 地球主磁场的NOC模型[J]. 中国科学:D辑, **32**(7): 576-587.
- Xu W Y. 2003. NOC model of the Earth's main magnetic field[J]. *Science in China: Series D*, **46**(9): 882-894.
- 徐文耀. 2003. 地磁学[M]. 北京: 地震出版社: 221-249.
- Xu W Y. 2003. *Geomagnetism*[M]. Beijing: Seismological Press: 221-249 (in Chinese).
- 徐文耀, 白春华, 康国发. 2008. 地壳磁异常的全球模型[J]. 地球物理学进展, **23**(3): 641-651.
- Xu W Y, Bai C H, Kang G F. 2008. Global models of the Earth's crust magnetic anomalies[J]. *Progress in Geophysics*, **23**(3): 641-651 (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).
- 曾融生. 1957. 大地电流勘探方法[J]. 地球物理勘探, (2): 1-7.
- Zeng R S. 1957. The exploration methods of the telluric current[J]. *Geophysical Prospecting*, (2): 1-7 (in Chinese).
- 中国地震局. 2006. 地震台站建设规范, 地电观测台站, 第2部分: 地电场台站(GB/T 18.2—2006)[S]. 北京: 地震出版社: 1-7.
- China Earthquake Administration. 2006. *Specification for the Construction of Seismic Station, Geoelectrical Station, Part 2: Geoelectrical Field Observatory* (GB/T 18.2—2006)[S]. Beijing: Seismological Press: 1-7 (in Chinese).
- 中国地震局. 2008. 地震观测仪器进网技术要求, 地电观测仪, 第2部分: 地电场仪 (GB/T 29.2—2008)[S]. 北京: 地震出版社: 1-11.
- China Earthquake Administratin. 2008. *Technical Requirements of Instruments in Network for Earthquake Monitoring-Geoelectrical Meters, Part 2: Meter for Geoelectrical Field* (GB/T 29.2—2008)[S]. Beijing: Seismological Press: 1-11 (in Chinese).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2004. 地震台站观测环境技术要求, 第2部分: 电磁观测(GB/T 19531.2—2004)[S]. 北京: 地震出版社: 1-16.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. 2004. *Technical Requirement for the Observation Environment of Seismic Stations, Part 2: Electromagnetic Observation* (GB/T 19531.2—2004)[S]. Beijing: Seismological Press: 1-16 (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.
- Zlotnicki J, Kossobokov V, Le Mouél J L. 2001. Frequency spectral properties of an ULF electromagnetic signal around the 21 July 1995, $M=5.7$, Yong Deng (China) earthquake[J]. *Tectonophysics*, **334**(3/4): 259-270.