

利用人工源超低频电磁波监测地震的试验与分析

赵国泽¹, 陆建勋²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 中国舰船研究院, 北京 100085)

[摘要] 由人工产生大功率超低频 (SLF) 电磁波可以在地面很大范围的许多测点同时测量该信号, 利用它可以研究地下电阻率结构和空间电磁场; 研究地震等引起的电磁场异常变化; 探测地壳结构和地下资源, 具有广阔的应用前景和发展潜力。在北京等地区的观测表明, SLF 信号的功率谱密度超过天然场源信号数倍以上, 所得到的视电阻率数据精度远高于天然源方法, 并有长时间的稳定性。在试验测量期间距测点约 120 km 发生的迁安 4.2 级地震与观测的电磁场异常和视电阻率的变化有较好的对应性, 对产生这些变化的可能的成因机制进行了分析和探讨。

[关键词] 超低频/极低频电磁波; 电磁异常; 电阻率; 地震监测

[中图分类号] P315; P318 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2003) 10-0027-07

1 前言

过去几十年, 用电磁方法观测到了地震前大量的异常现象, 特别是近年来, 许多事实说明, 地震之前的电磁效应是确实存在的, 如果能够说明它们与地壳物理过程之间的关系, 就能依此对地震事件作出预报^[1,2,3]。但是, 以前的观测往往是在一些局部地区、相互孤立地进行的, 所用的天然电磁场源不稳定, 容易受到非地震因素的干扰, 测量精度低, 和地震引起的电磁场变化基本在同等数量级不易区分。因此人们一直在致力于寻找观测数据精度更高、稳定性更强、能够在广大区域进行台网式长期观测的电磁新技术。

近十年来, 这一研究取得了相当大的进展。一是各国科学家加强了对利用卫星技术观测地震电磁异常的研究, 并最终促成了法国将于 2003 年底发射世界上专门用于地震电磁辐射监测的第一颗卫星 (TEMETER)^[4,5]。与此同时, 俄罗斯和美国的科学家利用他们各自国家的人工源大功率超低频 (super low frequency, SLF) 发射台发射的电磁波

信号, 在距发射台数千、上万公里的范围内高精度地观测电磁场变化, 并通过模拟天然地震的试验, 研究电场、磁场和大地电阻率的异常特点^[6]等一系列研究。

由于人工源超低频电磁波技术发射和接收的信号具有很高的精度和稳定性, 覆盖很大的面积, 特别适于地震、火山等灾难性事件的预测研究, 因此, 受到了国内外专家的高度重视。1997 年以来, 我们对该项技术进行了更深入的研究, 开展了国际交流和合作, 并在北京、天津等地通过接收约 6 500 km 外位于俄罗斯科拉半岛的超低频发射台的信号进行试验, 研究利用超低频信号对地震进行监测的可行性, 而这时恰逢迁安发生 4.2 级地震, 通过数据处理发现地震前后的电磁异常, 从而取得可喜的成果。本文将重点介绍观测试验结果, 并对地震和电磁异常之间的关系进行分析。

2 地震电磁监测新技术——人工源超低频电磁波技术简介

根据国际电联定义, 超低频 (SLF) 电磁波频

[收稿日期] 2003-07-07

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (40274017)

[作者简介] 赵国泽 (1946-) 男, 河北石家庄市人, 中国地震局地质研究所研究员, 博士生导师

率范围为 30~300 Hz。人工源超低频电磁波发射技术是地球物理和无线电物理巧妙结合的产物,是人工方法产生大功率交变电磁场的新技术。其发射装置是首先在陆地上选择有一定面积、并在一定深度范围岩石表现为高电阻率的地区,在地面架设一条或多条长数十公里的发射天线(或电缆),将每一条天线的两端分别用大尺度的接地体(接地电极)与大地连接。用大功率无线电发射机通过电缆和接地体向地下发送正弦波大电流(一般大于 100 A)。由天线、接地体、大地和发射机构成了一个交变电流等效“环路”,在环路内变化的电流感应生成交变电磁场。电磁场分布在地球及其周围空间,并在地面和电离层之间的“波导”中传播。由于电磁波在波导中传播时衰减很小,它可以传播到数千甚至上万公里,幅度和相位十分稳定,通过积分/滤波,可将干扰大幅度抑制从而获得高的信噪比。

在数千、上万公里范围的许多地点(台网)同时观测超低频电磁波的各个分量,既可研究大区域的地壳结构及其变化,又可研究大气层、电离层和岩石层的电磁场异常,这是天然源所做不到的。在数据采集和数据处理等方面,其原理与天然源 MT 法及人工源 CSAMT 法几乎相同。利用电磁场理论,可以计算超低频电磁波发射电流环路的磁矩 M 和一定距离观测到的电磁场强度。理论计算和实际测量表明信号强度与发射电流环的磁矩以及工作频率、收发距离及电离层参数等有关。

俄罗斯的超低频发射台位于科拉半岛 Murmansk 附近(称为 Zevs 台),这里地下电阻率很高(达 $10^4 \Omega \cdot m$)。发射天线由两条分别长 60 km 近东西向的天线组成。发射机功率达兆瓦以上,向地下发送的正弦波电流的幅度可达 200~300A,频率范围在几十到几百赫兹之间^[7-10]。

测量研究表明,尽管电离层活动随着时间有较大的变化(如日、月、季、年变化等),但在任何时刻人工源信号(SLF)强度都明显大于天然源信号(AMT)强度。其中,SLF 信号本身的功率谱密度也受到这种变化的影响,例如在相对于天线发射信号几乎最弱的方位、距天线 2 700 km 测点 Pyatigorsk 观测发现,白天和夜间的电磁场谱密度的差可达 30%~40%,但是用电磁场计算得到的大地阻抗或视电阻率对任何时间都是稳定的,其误差小于 2.5%。这比使用天然源 AMT 法测量得到

的视电阻率的误差(10%以上)小很多。所以,SLF 的视电阻率数值具有很高的精度和稳定性,特别适用于地震预测等需要精确观测数据的研究^[9,10]。

3 北京、天津等地的测量结果

1999 年,在位于首都圈的 5 个地震台站和测点,测量了约 6 500 km 外的科拉半岛超低频发射台的信号,5 个测点之间的最大距离超过 100 km,信号的频率为 80 Hz。5 个测点的电磁干扰背景差异很大。在天津宝坻地震台还进行了连续 10 天的测量,监测电磁场和电阻率随时间的变化。测量电场信号的电极距为 100 m,方位为北西 350 度。磁场传感器为感应线圈,方位为北东 80 度。

记录的时间序列回放图显示,SLF 信号电场和磁场强度都明显大于天然场的强度。对记录的数据用专门的软件进行了处理,得到各个测点的电磁场功率谱密度。图 1 为在宝坻地震台测量的磁场功率谱密度,当谱分辨率分别为 0.026 4 Hz, 0.002 58 Hz 和 0.000 32 Hz 时,SLF 的谱密度分别是 AMT 的 3 倍、20 倍和 250 倍,随着谱分辨率的提高,数据的信噪比也增大。

对比其他地方的测量结果说明,在距发射台较近、信号较强和干扰较小的地方采用较低的谱分辨率即可得到较高的信噪比。而在距发射台较远、信号较弱或者干扰较大的地方,通过提高谱分辨率可以提高信噪比。

图 2 给出宝坻地震台、北京西集地震台和蓟县 3 个测点的电场功率谱密度,所用的谱分辨率为 0.002 58 Hz。尽管 3 个测点的干扰背景都较强,但得到的 SLF 谱密度都比天然信号大 10~20 倍。图 3 给出 SLF 和 AMT 的功率谱密度和电、磁场之间相干度 G 的对比图,天然源信号的相干度为 0.1~0.5,说明测点附近干扰很强,但 SLF 信号相干度却高达 0.95,确保了 SLF 测量资料有很高的精度。

为了验证该技术进行地震预测的能力,监视电磁场随时间的变化,在宝坻台进行了连续 10 天(1999-05-04—1999-04-14)的观测,每天测量的时间段相同。在这期间,电场和磁场传感器的位置和布设条件、发射信号的频率、信号幅度以及接收器性能和工作状态等都维持固定不变。测量表明,尽管在 10 天内天然场 AMT 的谱密度(背景场)发生了一定的变化,但 SLF 的谱密度都超过

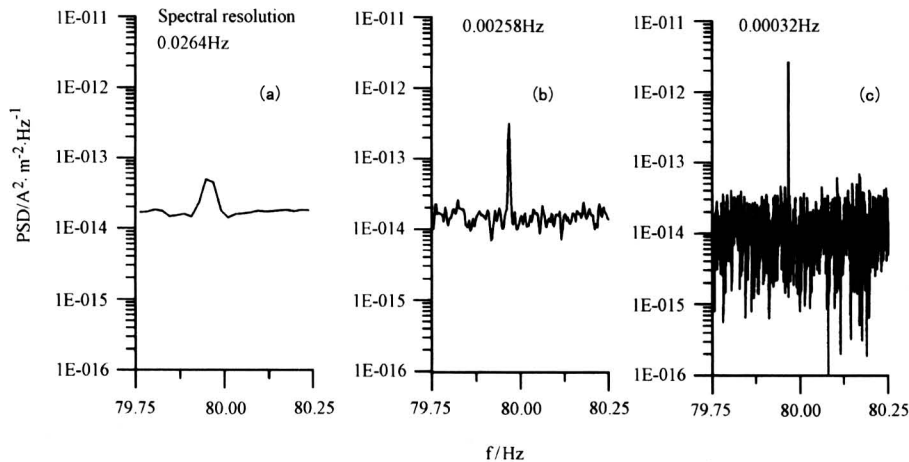


图 1 在宝坻测量的 SLF 磁场 (H) 信号的功率谱密度 PSD

Fig.1 Comparison of magnetic field PSD of the SLF radio station signal at different spectral resolutions (Baodi site, 1999)

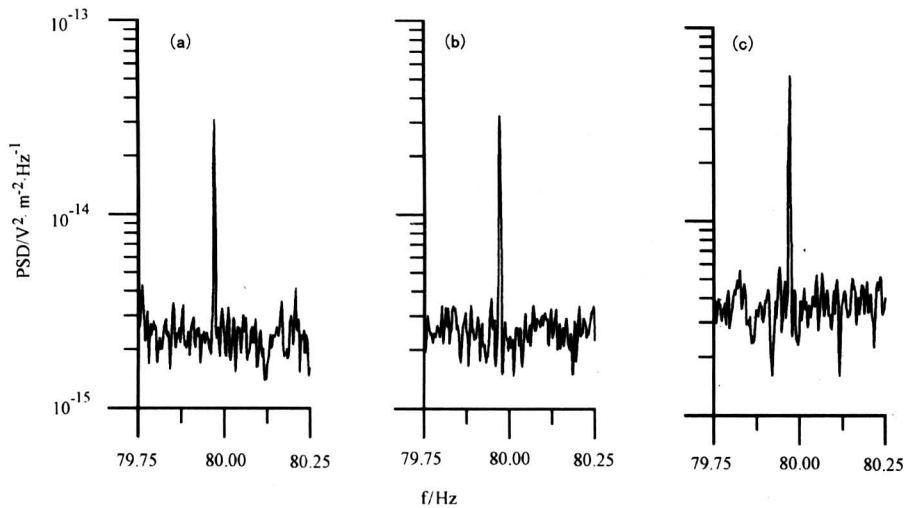


图 2 宝坻 (a)、西集 (b) 和蓟县 (c) SLF 电场信号的功率谱密度 PSD, (谱分辨率为 0.002 58 Hz)

Fig.2 Comparrisuon of electric field PSD of the ELF transmitter signal in airrerent sires: Baodi (a), Xiji (b) and Jixian (c), (Spectral resolution 0.002 58 Hz)

背景场 7 倍以上。同时发现, SLF 功率谱密度的幅度变化与背景场的变化没有直接关系。

依据 10 天内观测的 SLF 电场和磁场资料, 计算了这期间的视电阻率和相位。10 天内电场、磁场、视电阻率和相位的变化可分为两个时段(图 4)。在 4—9 日期间, 为相对稳定的变化阶段, 其中电、磁场功率谱密度变化幅度约为平均值的 20%, 而视电阻率基本稳定在 25 Ω·m 左右, 推测这些变化是电离层、大气层空间电磁场常规扰动和

环境噪声对人工源信号综合影响的结果。而视电阻率数值与电场和磁场的比值有关, 电场和磁场同时变化但比值不变反映了台站地下的电阻率基本稳定。用相干度和误差分析法估算视电阻率数据的误差小于 2.9%, 与此同时, 还用天然源 AMT 法测量得到视电阻率数据, 其误差达到 10% 以上(干扰较强时, 误差更大), 远大于人工源场视电阻率的误差, 再次说明视电阻率比电磁场本身受背景场影响小, 并且比天然源方法有更强的抗干扰能力。

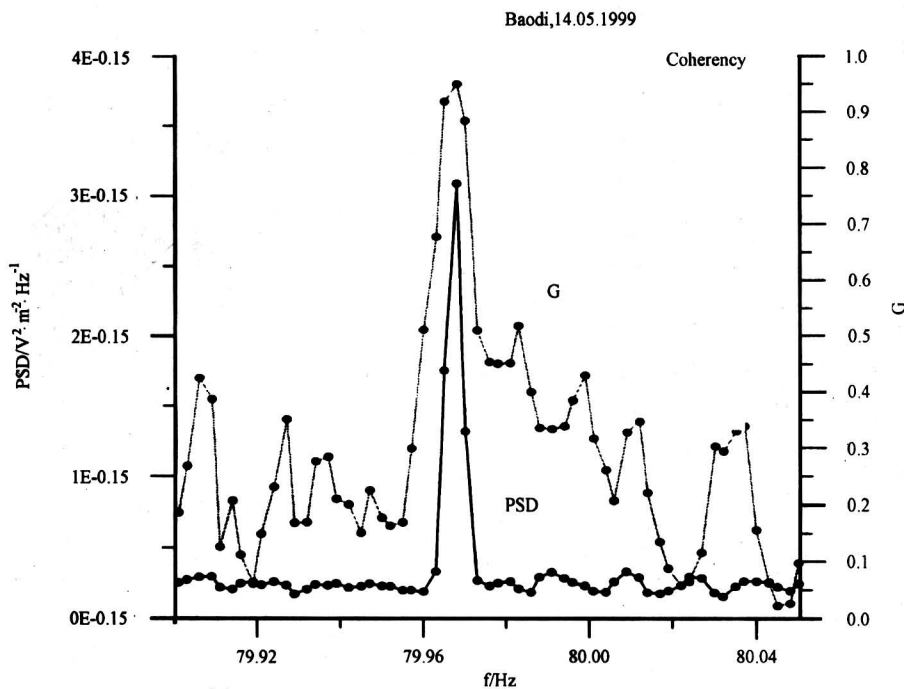


图3 宝坻地震台 SLF 和天然源电场 (E) 信号的功率谱密度 PSD 和相干度 G 对比图
(谱分辨率为 0.002 58 Hz)

Fig.3 Electric field PSD of the ELF radio station signal at Baodi site and comparison graphic of coherency G (spectral resolution of 0.002 58Hz)

在 10—14 日期间, 电磁场和视电阻率都出现了较大的变化。其中 10—12 日电磁场变化幅度逐渐增大, 至 12 日它们的变化幅度达到平均值的近 2 倍, 而视电阻率在这期间增幅约为 10%。13 和 14 日电磁场变化幅度和视电阻率又出现逐渐减小的趋势。

恰在这期间的 12 日 8 时 55 分, 在距测点约 120 km 的东偏北方向的迁安发生了 $M_L = 4.2$ 级地震, 震源深度 33 km。下面将作进一步讨论分析。

在实验中, 我们还用 AMT 法在几个测点测量了视电阻率的日变化, 并与固体潮汐地形变进行了对比。图 5 是 5 月 8 日—5 月 9 日在天津蓟县测点测量得到的南北方向视电阻率变化曲线与东西地形变及温度变化对比图。可见, 南北向视电阻率变化与东西向地形变的变化 (dE) 对应性较好。其中夜间时段对应性更好, 白天对应性较差的原因是由于白天各种电磁干扰较强引起的。而视电阻率变化与温度变化之间没有明显的关系, 尽管日夜间温度变化了 15 度以上。

4 讨论和分析

迁安地震前出现的电磁场扰动幅度和视电阻率

数值的增大是否与地震有关? 如果有关, 成因机制如何? 是人们关心的问题。要搞清这一问题, 一般从异常的源位置、引起异常的因素以及异常出现的范围等方面进行研究。

关于异常电磁场的源一般归结为来自地震震源区, 来自于地表或上层地壳和来自于大气层或电离层。应力变化是较受重视的引起电磁场异常的因素。其中, 当地壳岩石裂隙中存在流体时, 电动效应和孔隙度几何学或孔隙体积变化被认为是引起电阻率变化和震电信号的重要原因^[11]。而在干岩石的情况下, 压电和摩擦生电效应具有重要作用。

在地震震中附近的震电信号或电磁辐射, 以及其与电离层扰动的联合作用, 导致在震中区一定范围内可观测到电磁场异常。一般情况下, 震级越大, 出现异常的范围越大, 反之范围较小; 较低频率的异常在震前出现得较早, 如震前 20 天左右, 较高频率的异常出现较晚如震前 2—3 天^[12~15]。

震前电磁现象表现形式还可能与地震发生的位置和构造条件等有关。5 月 12 日的迁安 4.2 级地震和宝坻地震台测点都位于燕山台褶带的马兰峪复式背斜, 靠近震中存在一条北北东向的青龙—滦县大断裂, 推测迁安地震的发生与该断裂有关。震中

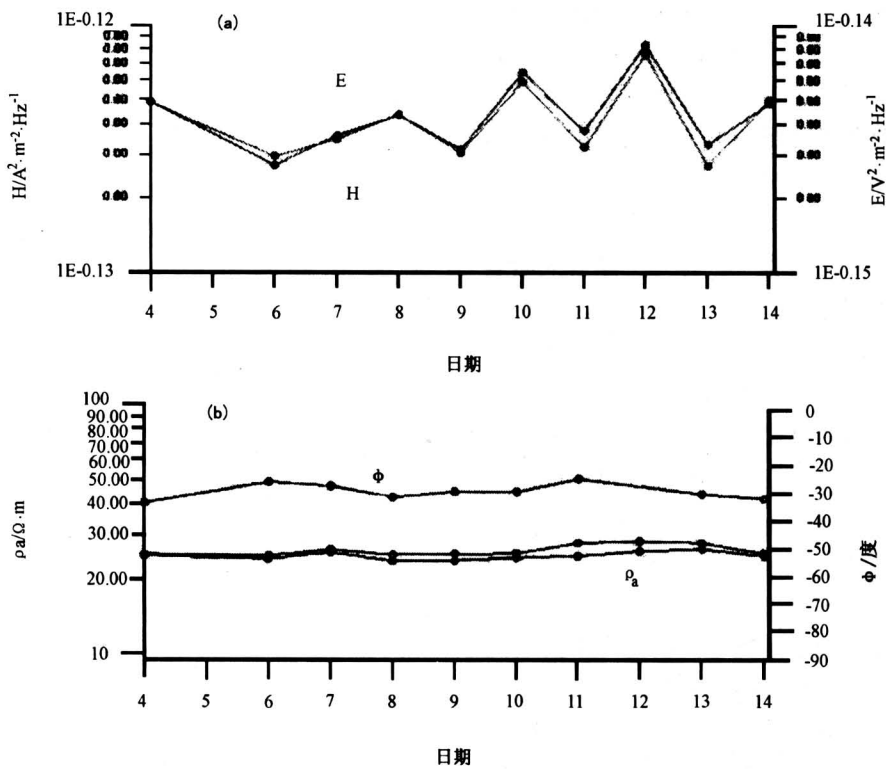


图 4 1999 年 5 月 4—14 日，在宝坻地震台观测的 SLF 电 (E)、磁 (H) 场功率谱密度及其变化 (a)，视电阻率 ρ_a 和阻抗相位的变化 (b)，两条视电阻率曲线表示视电阻率可能的最大值和最小值 (谱分辨率为 0.000 32 Hz)

Fig.4 Electric and magnetic field PSD amplitudes, apparent resistivity and phase of impedance variations in period May 4—14, 1999 (Baodi site.ACF-2.2 device)

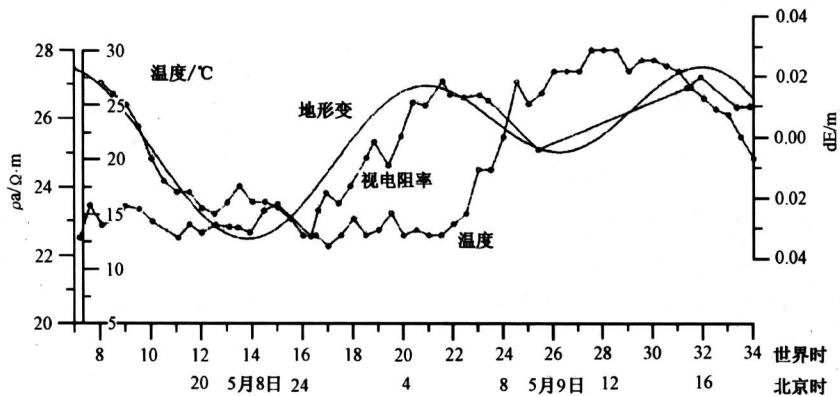


图 5 频率为 12~16 Hz 的南北方向视电阻率 ρ_a 与东西地形变 dE 和温度变化曲线 (谱分辨率为 0.002 58 Hz)

Fig.5 Comparison of apparent resistivity (12-16Hz) in NS direction with tidal deformation and temperature from May 8 to May 9, 1999

区现今应力场分布显示主压制应力方向为北东东向^[16~18]。而测点和震中连线为北东东方向，与青

龙-滦县大断裂走向近似垂直，与震中区的主压应力方向基本一致。在孕震过程中，在主压应力方向

上即在震中区的西侧和东侧,岩石的孔隙度降低,导致电阻率增大,所以在宝坻测点观测到10日到12日视电阻率约增大10%。当然也不排除由于压电效应使极化电荷和极化场增大,引起视电阻率的升高。类似的现象已在1998年1月10日张北地震前后曾经观测到^[19]。

在地震孕育和发生过程中,青龙-滦县大断裂等处的摩擦生电作用也可能引起电磁辐射,从而引起电场和磁场的扰动。根据经验,5级左右地震可以引起震中附近二、三百公里范围出现异常。所以在宝坻观测到的震前的电磁场扰动幅度和视电阻率的增大,可以认为是区域应力场和局部电磁源共同作用的结果。而地震后(12—14日)电磁场扰动的幅度和视电阻率逐渐减小,可以看成是地壳的恢复过程。

需要说明,目前关于地震电磁前兆异常的成因机制尚没有统一的大家都能接受的解释,而这次测量是在中国进行的首次SLF测量,在测量过程中遇到迁安地震的发生并从电磁数据中分析到这一异常现象纯属幸运与巧合,如果有多个测量点同时记录到这一现象就能更好地进行分析。要彻底说明异常和地震的关系,完全解释这些异常的成因,还需要更多的观测资料进行统计研究和分析。迁安地震的震源发生在地下33 km,而80 Hz的趋肤深度约3 km多,如果用更低频率,例如8 Hz趋肤深度将达10 km以下,可能会得到更明显的视电阻率变化,因此多点同时接收和采用更宽频带的超低频/极低频(SLF/ELF)人工源电磁波技术将是今后重要的发展方向。

关于视电阻率的日变化和固体潮汐地形变日变化之间的对应关系在世界其他地方也已观测到,特别是用高精度的超低频电磁波技术观测发现它们的相关性达到95%^[9]。利用这种关系,可以在两种数据之间相互校正和补充,更有利于捕捉地震可能引起的前兆异常。

总之,测量结果表明,人工源大功率超低频电磁波技术特别适用于在非常大范围进行长期的和同时的观测,并能得到高精度的电磁场和视电阻率观测数据,它不仅可在地震、火山、洪水等灾难性事件预测研究中发挥作用,而且在资源探测中也会发挥重要作用。我国应该不失时机地发展更宽频带的人工源电磁波技术,为减灾、环境、资源和科学研究等做出贡献。

致谢:感谢中国地震局和中国舰船研究院等部门给予的大力支持和帮助。

参考文献

- [1] Johnston M, Uyeda S. Electromagnetic Methods For Monitoring Earthquakes and Volcanic Eruptions, 1999, JSA15/GA 1.18, IUGG
- [2] 马宗晋,傅征祥,等.中国九大地震[M].北京:地震出版社,1982
- [3] 国家地震局地质研究所大地电磁测深组,北京凤河营地区的地壳电性结构及其在唐山大震前后的变化,国家地震局地质研究所大地电磁测深组,国家地震局兰州地震研究所大地电磁测深组编.大地电磁测深[M].北京:地震出版社,1981.89~95
- [4] Parrot Michel. The micro-satellite DEMETER[J]. J Geodynamics, 2002, 33, 535~541
- [5] Российкая Академия Наук, Краткосрочный Прогноз Катастрофических Землетрясений с Помощью Радиофизических Наземнокосмических Методов [M]. Москва, 1997
- [6] M. Gokhberg, A. Sarev, M. Pertel, et al. Study of ionospheric perturbation related to quarry explosions in the range of extremely low frequencies, 2002
- [7] A C Fraser-Smith, P R Bannister. Reception of ELF signal at antipodal distance[J]. Radio Science, 1998, 33, (1): 83~88
- [8] A Saraev, P M Kostkin, V Ivochkin. Polarization characteristics of the electromagnetic field from a VLF radiowave transmitter[J]. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 1998, 34, (7): 570~575
- [9] A Saraev, M Pertel, Z Molkin. Correction of the electromagnetic monitoring data for tidal variations of apparent resistivity[J]. J Applied Geophysics, 2002, 49: 91~100
- [10] Saraev A K, Pertel M I, Parfent'ev V E, et al. Experimental study of the electromagnetic field from a VLF radio set for the purposes of monitoring seismic activity in the North Caucasus[J]. Izv, Physics of the Solid Earth, 1999, 35, (2): 101~108
- [11] Parrot M, Achache J, Berthelier J J, et al. High-frequency seismo-electromagnetic effects[J]. PEPI, 1993, 77: 65~83
- [12] Fraser-Smith A C, Bernardy A, McGill P R, et al. Low frequency magnetic field measurement near the epicenter of the Loma-Prieta earthquake[J]. Geophys Res Lett, 1990, 17: 1465~1468

- [13] Kopytenko Yu A, Maatiashvily T G, Voronov P M, et al. Discovering of ultra-low-frequency emission connected with Spitak earthquake and its aftershock activity on data of geomagnetic pulsations observations at Dussheti and Vardzija[J]. Moscow, IZMIRAM, Preprint, 1990, 3 (888): 27
- [14] Ismaguilov V S, Kopytenko Yu A, Hattori P M, et al., ULF magnetic emissions connected with under sea bottom earthquakes[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2001, 1: 1~9
- [15] Mogi K. Earthquake prediction[M]. Academic Press, Tokyo, 1985. 382
- [16] 马杏垣. 中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1989
- [17] 国家地震局《一九七六年唐山地震》编辑组. 一九七六年唐山地震[M]. 北京: 地震出版社, 1982
- [18] 河北省地质矿产局. 河北省北京市天津市区域地质志, 北京: 地质出版社, 1989
- [19] 赵国泽, 刘国栋, 詹 艳, 等. 张北 - 尚义地震区及其邻区地壳上地幔结构[J]. 地震地质, 1998, 20, (2): 155~163

Monitoring & Analysis of Earthquake phenomena by Artificial SLF Waves

Zhao Guoze¹, Lu Jianxun²

(1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

2. Chinese Academy of Ship R & D, Beijing 100085, China)

[Abstract] Electromagnetic waves in SLF (super low frequency) frequency band can be transmitted by powered generator using geophysical theory combined with radio-physical theory. The artificial signals can be measured in a quite large area on earth surface for investigation of the space electromagnetic field and crust conductivity structure. The method is a useful tool to study electromagnetic anomaly caused by earthquake and to probe the subsurface resources. The experiment study in Beijing and Tianjin indicated that power spectrum density of SLF signal is bigger than those of natural electromagnetic signal by several times even in the industry noisy area. The apparent resistivity obtained by SLF method has much smaller error bar than those by natural signal and is less influenced by disturbance. An earthquake ($M=4.2$) occurred near observation site during SLF measurements and coherency between earthquake phenomena and the anomaly of electromagnetic field and apparent resistivity was appeared. It is postulated that the anomaly of electric and magnetic fields and the variation of apparent resistivity were generated due to interaction between regional stress and local electromagnetic source.

[Key words] SLF/ELF electromagnetic waves; electromagnetic anomaly; resistivity; earthquake monitoring