

一种可能的地震 ULF 电磁发射现象^{*}

李兴才¹⁾ 曹惠馨¹⁾ 俞铁宏¹⁾ 陈智勇²⁾

1) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

2) 中国河北廊坊 102800 廊坊市地震局

摘 要

通过对发生在北京附近的两次地震之前，在几个台站上观测到的 ULF 电磁发射异常分析，并与亚美尼亚等地震前观测到的 ULF 电磁发射信号的横向比较，提出了一种可能与地震有关的电磁发射现象。它的主要特征是：① 异常扰动在地震前若干天内间歇性地出现，频率明显地高于 ULF 频段的暴间磁扰和地磁脉动的频率，至少不低于 1 Hz；② 同一地震同一观测点的同类仪器，包括观测磁场分量的和电场分量的仪器都同时观测到了类似的异常信号；③ 同一地震距震中较近的台站与较远的台站相比，出现异常的时间较早，频率也较高；④ 异常信号的大小可能与地震的大小有关。较强的地震发射的电磁信号较强，并且信号强度在不同频率范围内的分配可能不同；⑤ 在地震之前能够观测到 ULF 电磁异常发射的地震似乎有一个震级阈值，如果较小的地震也有电磁发射的话，现有仪器的灵敏度可能还观测不到。

主题词 电磁辐射；短临异常；超低频段

概 述

近几年来，随着地震预报及其观测技术的发展，与地震有关的电磁发射(EME)现象的观测与研究逐步受到地震学家们的重视，并且在某些地震尤其是一些比较大的地震，如 1988 年的亚美尼亚地震和 1989 年的洛马普列塔地震之前，都观测到了引人注目的电磁发射异常现象(Fraser-Smith *et al.*, 1990; Molchanov *et al.*, 1992)。另一方面我们注意到，虽然地震 EME 现象的频谱可能很宽，但是，考虑到地震的震源位于地表之下十几公里的深处和高频信号衰减较快的特点，因此，目前的观测多数在超低频(ULF)段进行。

当前国内在 ULF(0—10 Hz)频段的观测大体可分为两类：超低频磁场观测和电场观测。传感器分别采用感应线圈和电极；记录方式多为模拟的笔绘滚筒记录。

* 国家地震局“八五”课题资助项目。国家地震局地球物理研究所论著 95A0062
1994 年 2 月 23 日收到初稿，1994 年 9 月 19 日收到修改稿并决定采用。

所谓地震电磁发射现象(EME)是指与地震孕育有关的电磁发射现象。但是,由于电磁发射现象的源较多,并不只是地震,还包括人为活动及高空电磁活动的电磁发射效应等。这里,我们把它们都称之为干扰。正因为这些干扰的存在,使得即使有与地震有关的电磁发射现象,但要把它们从观测资料中分辩出来却不是一件很容易的事。因此,弄清正常的观测背景和干扰,以及地震电磁发射异常的主要特征是一项十分基础的工作。

1 ULF 电磁发射观测的背景水平和主要干扰

观测背景水平的获得和对干扰特征的认识主要依赖于经验,它要靠观测资料的长期积累和分析,而且还要有针对性地做一些试验。图 1 是白家疃台经过上述过程归纳出的

几种典型的非地震电磁发射干扰的特征,主要来自传感器附近的人为活动和高空的强电磁扰动。其中图 1(a-1)为雷电干扰,图 1(a-2)为铁器移动的干扰。来自高空的强电磁扰动主要是地磁脉动和暴间磁扰(图 1b),它们的低频成分比较发育而且扰动幅度较大,比较容易识别;如果再参考由磁变仪获得的磁照图,就不难把它们与磁暴和磁脉动联系起来。当然,当它们出现在地震发生之前时,也不能排除其中隐含有某些与地震有关的信息的可能性。

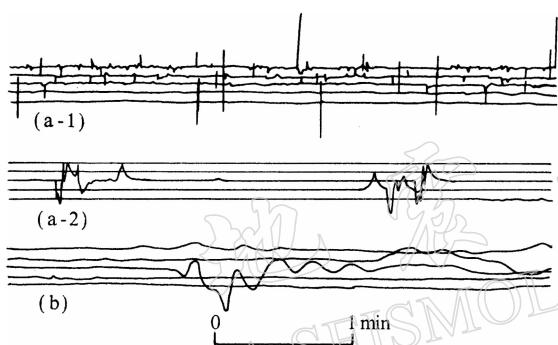


图 1 某些人为和非人为活动的电磁效应示例

(a-1)雷电干扰, (a-2)传感器附近的
铁器移动的干扰; (b) 暴间磁扰

但由于尚未作完这方面的工作,所以,本文统统把它们视为干扰。

从图 1 可以看出,ULF 电磁发射观测的实际记录曲线,在没有人为和高空电磁扰动的情况下,基本上是一条直线,这就是这类观测的所谓正常背景水平。

2 地震 EME 的可能特征

本文在确认可能的地震 EME 现象时遵循以下规则:① 同一地震在同一观测点的同频段仪器都同时观测到类似的电磁信号,并且最好既有电场分量的仪器观测,也有磁场分量的仪器记录;② 同一地震不同观测点上的同类仪器都观测到类似的信号;③ 异常信号对不同地震应具有重现性。

这里,我们以发生在北京附近而且比较大的两次地震,即大海陀山地震和陡河地震为例来分析一下可能与地震有关的 EME 现象。分析中涉及到的台站和地震的相对位置表示在图 2 中。

2.1 大海陀山地震前的超低频 EME 现象

大海陀山地震发生在 1990 年 7 月 21 日,震中位置为 $115^{\circ}30' E$, $40^{\circ}35' N$, 震源深度 8 km, 震级 $M_L = 5.4$, 白家疃台距震中约 85 km。

北京白家疃台观测电磁发射场磁场分量的 ULF 仪器(频响 0.01—20 Hz)在地震之

前 5 天, 即 7 月 17 日开始断续地观测到背景扰动增强的现象, 直至地震前的十几小时。虽然在两个分向上都同步地观测到这种扰动, 但是由于两个分向的灵敏度有所不同, 所以, 比较明显的异常一般都出现在灵敏度相对较高的南北分向(格值 0.06 nT/mm)上。图 3a 是 7 月 17 日记录到的部分异常扰动的图形(南北向)。宏观上看这种信号的特点是: ① 扰动信号的出现不是连续的而是间歇性的, 每次出现的持续时间不等, 短者只有十几秒钟, 长者达数分钟(图 3b); ② 扰动幅度一般为正常值的 3—15 倍, 最大约 0.15 nT ; ③ 扰动的频率较高, 但由于记录器走速(60 mm/min)的限制, 直观上只能分辨出 1 Hz 以下的信号。所以, 看来异常扰动的频率不会低于 1 Hz ; ④ 异常扰动段之间的间隔也不尽相同。在起始阶段, 这种异常信号出现的频次(指 1 天内出现的异常时间段的次数)较低, 频次较高的时段是 7 月 19 日零时左右, 持续约 24 小时。图 3c 给出了日频次 N 的直方图。

为了确认上述异常信号与大海陀山地震有关系, 即只是在此次地震之前才出现这种信号, 我们进一步分析了这次地震前后 3 个月的资料, 异常扰动段的持时随时间的变化示于图 4a 中。可以看出, 除了大海陀山地震之前的几天内出现了上述异常扰动外, 其余的时间都没有出现过类似的现象。

此外, 这次地震前, 在距震中较近的怀来台和比白家疃台稍远一些的廊坊台(图 2), 设置的观测 ULF($0.1\text{--}10 \text{ Hz}$)频段的自然电场交变成分的仪器也观测到了与白家疃台相类似的扰动信号。其中, 怀来台的起始时间为 7 月 16 日, 最高频次发生在 7 月 17 日; 廊坊台的起始时间为 7 月 18 日, 最高频次出现的时间是 7 月 19 日。

高空电磁活动对地磁场的扰动在 ULF 频段仪器上的响应, 是一种较低频率的 ULF 磁扰信号。根据我们的统计分析, 其中出现比较多的一种信号(如图 1b 所示)主要和磁暴有关系, 我们称之为暴间磁扰, 而且暂时也把它当作干扰来对待。比较图 1b 和图 3a 可知, 在大海陀山地震之前出现的那种 ULF 地磁扰动信号, 要比暴间磁扰或磁脉动信号的频率高得多, 形态上也十分不一样。因此, 可以认为它们与高空的电磁扰动没有什么关系。然而, 为了证实这种看法, 我们进一步统计了白家疃台在大海陀山地震前后 3 个月内的日磁情指数 K 之和($\Sigma K/d$)随时间的变化(图 4b)。结果表明, 除了 6 月 13 日左右因有一次较大的磁暴($K=6$), 以致使 $\Sigma K/d$ 较大之外, 其它时间的 $\Sigma K/d$ 均小于 27, 而且对比图 4a 可以看出, 即图使在发生那次磁暴的时间段内, 观测记录上也并未出现过前面所说的那种高频的 ULF 异常扰动。因此可以认为, 在大海陀山地震前观测到的频率较高的 ULF 异常扰动现象与高空的电磁活动没有关系。另一方面, 考虑到在那段时间里值班记录上也没有值得注意的人为干扰, 所以, 如果说这种异常信号可能是由大海陀山地震引起的是有道理的。

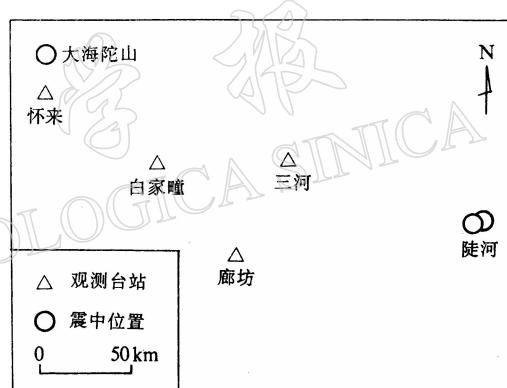


图 2 地震和有关观测台站的相对分布

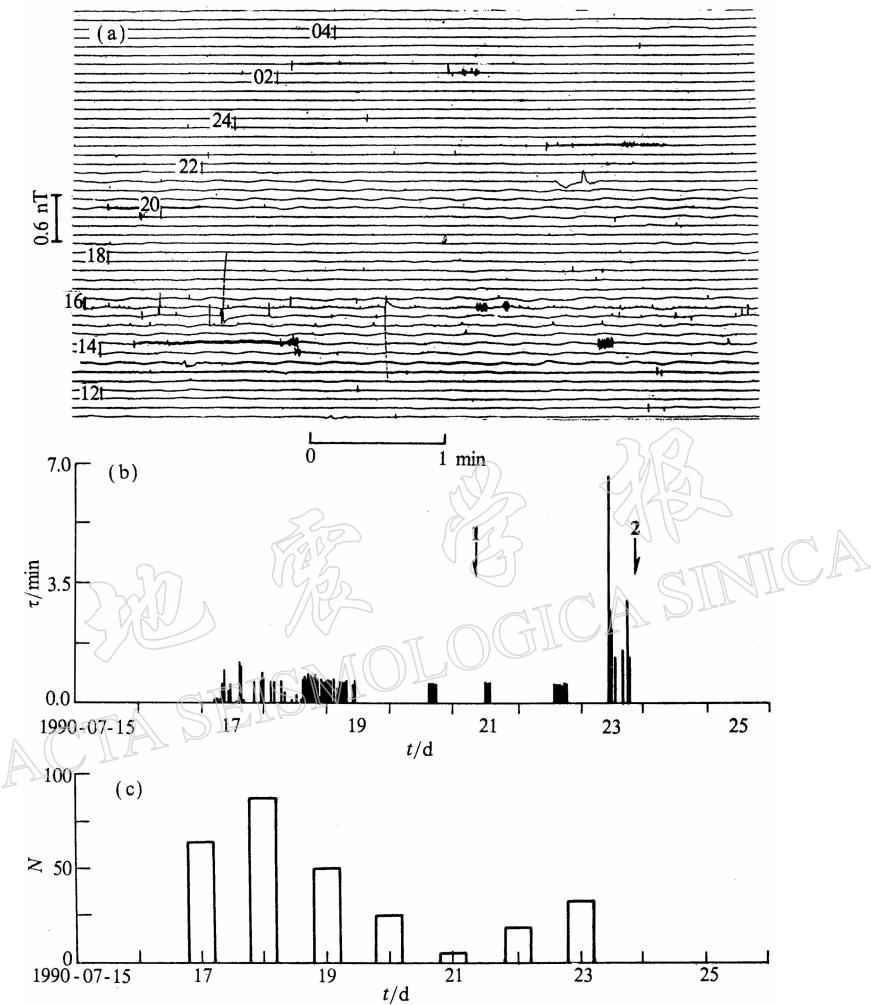


图 3 1990 年 7 月 21 日大海陀山地震前的 ULF 电磁异常

(a) 7 月 17 日白家疃台的 ULF(0.01–20 Hz)电磁发射的磁场分量异常的部分记录(南北分向);

(b) 异常扰动的持续时间 τ 随时间的变化, 标有 1 和 2 的箭号分别指示大海陀山地震和古冶地震(1990-07-23, $M_L=5.2$)的发震时间; (c) 异常扰动频次的直方图

另外, 白家疃台周围地区除大海陀山地震之外的其它比较小的地震, 也可能对上述观测到的现象有所贡献。为此, 我们统计了距白家疃台 250 km 范围内的 $M_L \geq 2.0$ 地震的日释放能量之和 $\Sigma \lg E/d$ (这里 \lg 表示对地震的能量 E 取对数)随时间的变化, 结果示于图 4c 中。由图 4c 可见, 在白家疃台于大海陀山地震前观测到异常电磁发射的时间段正好是其周围地区的较小地震比较平静的时段, 而且即使在有小地震发生的时间段里也没有观测到前面所叙及的那种异常扰动信号。因此, 如果这种现象与地震有关系的话, 只能是由较大的大海陀山地震引起的。当然, 或许也包含着 7 月 23 日古冶地震($M_L=5.2$)的影响。

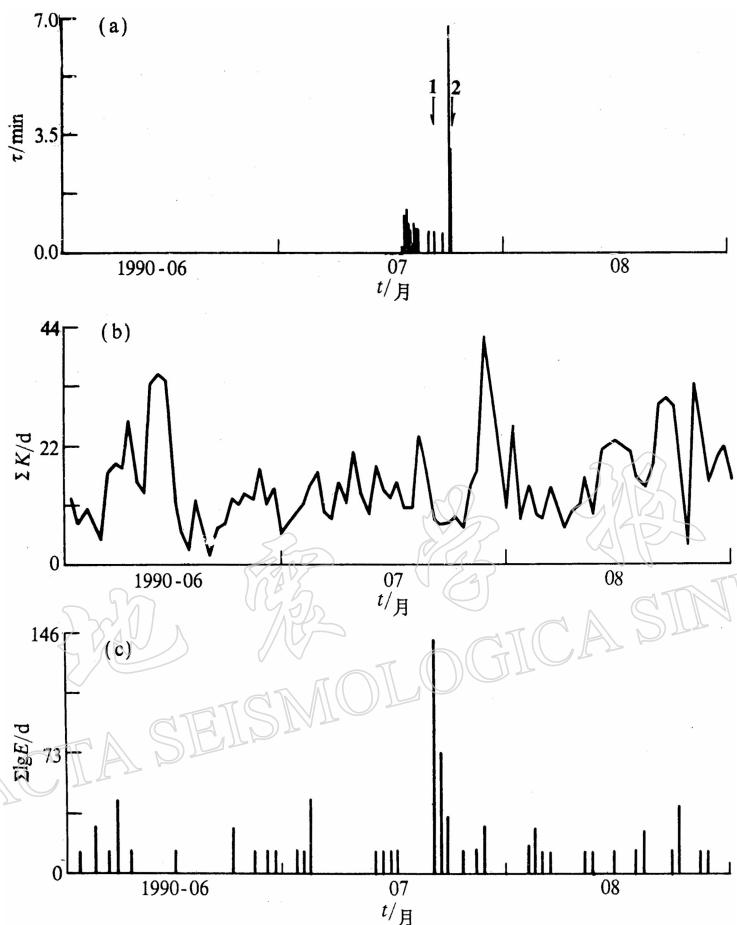


图 4(a) 大海陀山地震前后 3 个月内 ULF 高频电磁扰动的持续时间 τ , (b) 日 K 指数之和 $\Sigma K/d$, (c) 距白家疃 250 km 范围内 $M_L > 2.0$ 的地震日释放能量之和 $\Sigma \lg E/d$ 随时间的变化

2.2 陡河地震前的 ULF 系统的观测结果

1991 年 5 月 29 和 30 日, 在唐山附近的陡河分别发生了 $M_L 5.2$ 和 $M_L 5.6$ 两次地震, 震中位置分别位于 $118^{\circ}18'E, 39^{\circ}41'N$ 和 $118^{\circ}16'E, 39^{\circ}41'N$ 。地震之前, 3 套 ULF 仪器正在白家疃台(震中距离约为 180 km)进行对比观测, 其中包括两套观测磁场分量的仪器和一套观测电场分量的仪器。5 月 19 日, 这 3 套仪器开始同时观测到与大海陀山地震前观测到的信号相类似的异常扰动。5 月 20 日扰动段出现的频次达到最高值(11 次)。图 5 是部分实测曲线。其中, 图 5a 和图 5b 相应于 ULF 磁场分量的记录, 图 5c 为相应于 ULF 电场分量的记录, 均为南北分向。从图 5a—图 5c 中标有 1, 2, 3 的那组信号可以看出, 各套仪器出现异常的时间是同步的(注意, 因图 5c 相应仪器的记录器走速是图 5a 和图 5b 相应仪器走速的 2 倍, 因此, 异常段之间的间隔为它们的 2 倍), 表明这种异常信号是来自同一个电磁源的。至于各套仪器上记录到的扰动幅度的差异, 则是由于仪器灵敏度的差异造成的。另一方面, 从磁照图分析可知, 在此期间并没有高空的强电磁活动,

因此, 异常信号可能与陡河地震有关.

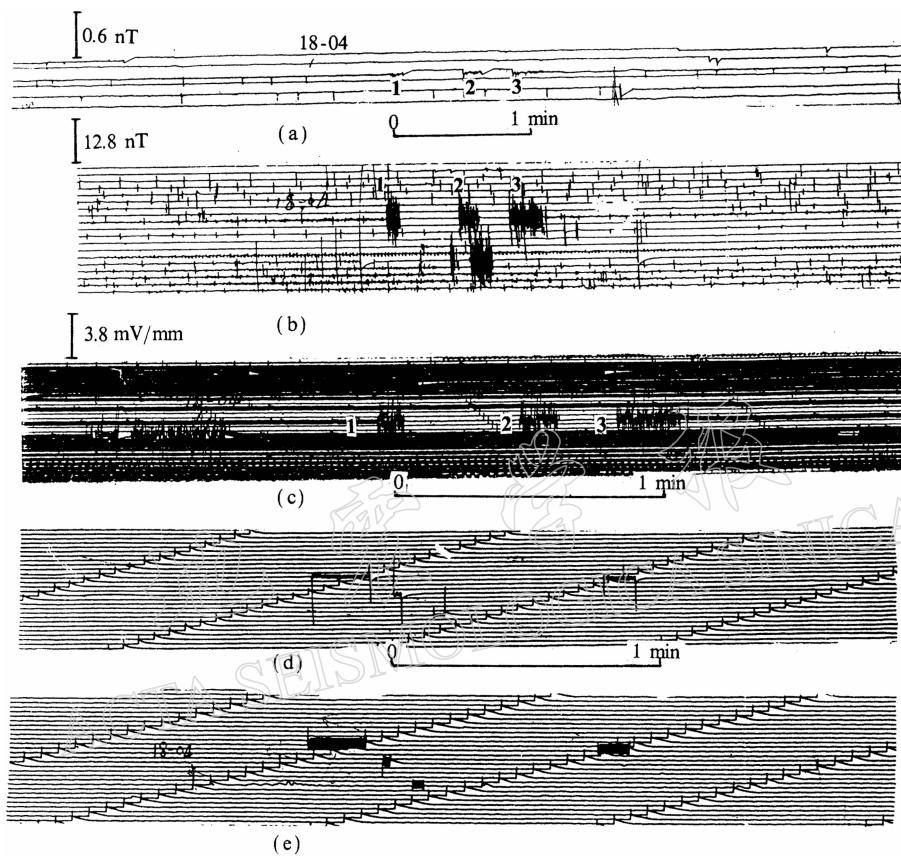


图 5 1991 年 5 月 29 和 30 日陡河地震前 ULF 仪器的实测记录曲线

- (a) 5 月 20 日白家疃台 ULF(0.01—20 Hz) 磁场分量(南北)的部分记录
- (b) 5 月 20 日白家疃台 ULF(0.1—10 Hz) 磁场分量(南北)的部分记录
- (c) 5 月 20 日白家疃台 ULF(0.1—10 Hz) 电场分量(南北)的部分记录
- (d) 5 月 19 日三河台 ULF(0.1—10 Hz) 电场分量(南北)的部分记录
- (e) 5 月 19 日三河台 ULF(0.1—10 Hz) 磁场分量(东西)的部分记录

比较一下这次地震前三河台的观测结果, 对于确认异常信号与地震的关系或许是有帮助的. 三河台距震中较近, 约 108 km. 前面所说的异常扰动信号在三河台是在 5 月 18 日开始出现的, 5 月 19 日频次最高, 达 12 次, 比相对震中较远的白家疃台出现高频次的时间约早 1 天, 这一特征与在大海陀山地震前所获得的结果也是相似的. 另外, 观察图 5 给出的记录特征发现, 三河台的记录曲线的特征与白家疃的不大一样, 宏观上看象是涂抹了似的(图 5d, 图 5e), 说明它的频率比在白家疃台观测到的还要高。

3 讨 论

综上所述, 可能与地震有关的 ULF 电磁异常扰动的特征可概括为: ① 地震前若干

天内间歇性地出现异常扰动，扰动频率明显地高于暴间磁扰和磁脉动的频率，并且至少不低于 1 Hz；② 同一地震同一观测点的相近频段的 ULF 仪器（包括观测磁场分量的和电场分量的仪器），同时都观测到类似的异常扰动；③ 同一地震在不同的观测点上的同类仪器都观测到类似的异常，而且较近的台站异常出现的时间较早，频率也比较高。

将上述特征与某些文献中论及的 EME 异常信号的特征作一下横向比较是有意义的。文献中所提及的诸震例中，最引人注目的是 1989 年的洛马普列塔地震 ($M_L = 7.1$) 和 1988 年的亚美尼亚地震 ($M_L = 6.9$)。这两次地震之前都观测到了 EME 异常现象。但是，由于对洛马普列塔地震给出的 ULF 异常信号不是原始波形，因此，就异常的波形而言，只能与在亚美尼亚地震前观测到的信号作一下比较（图 6）。对比图 3、图 5 和图 6 不难发现，它们的异常形态是十分相似的。在文献报道过的其它震例中，例如 Fujinawa (1990) 提出的 1989 年 7 月 9 日日本伊豆震群（最大地震 $M_S = 5.5$ ）前观测到的电磁背景的变化也具有明显的间歇性特征。所以，信号出现的间歇性可能是地震电磁发射异常的一个基本特征。

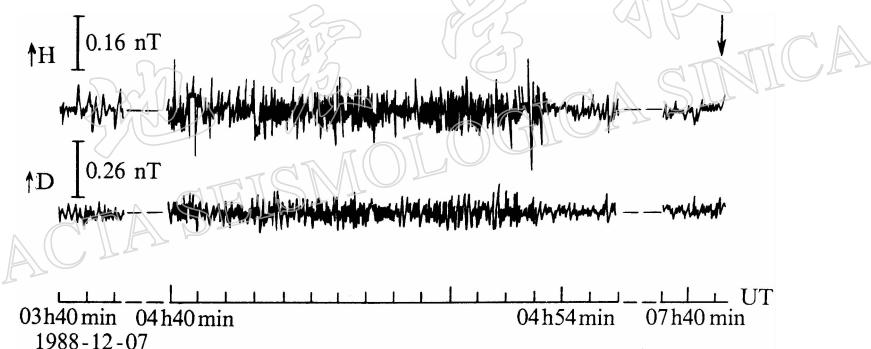


图 6 1988 年 12 月 7 日亚美尼亚地震前在 Dusheti 台观测到的 ULF 电磁异常的部分实测曲线
(磁场分量)。中间一段即 04 h40 min—04 h54 min 的时段为异常信号段，其它时段的
记录为背景噪声，箭头指示地震的发生时间(取自 Molchanov *et al.*, 1992)

亚美尼亚地震发生在 1988 年 12 月 7 日。地震前 5 天距震中 129 km 的 Dusheti 观测站上的磁变仪，在 0.1—1 Hz 频段观测到扰动幅度间歇性增大的现象，最大扰动为 0.2 nT；对于洛马普列塔地震，震前获得的异常 EME 信号的台站是 Corralotos，震中距离仅 7 km，在 0.01—10 Hz 范围内，开始观测到异常的时间是震前 12 天，最大异常幅度 5 nT。注意到亚美尼亚地震和洛马普列塔地震的震级相当，而在 Corralotos 观测到的洛马普列塔地震的 EME 异常却比在 Dusheti 观测到的亚美尼亚地震的 EME 异常大得多。因而，与地震有关的 EME 异常的强弱可能与震中距离有关系。对于大海陀山地震，虽然白家疃台的震中距离比 Dusheti 的小，但由于此次地震的震级比亚美尼亚地震的小得多，所以，观测到的异常比亚美尼亚地震的小，只有 0.15 nT，但似乎仍和震级之间的差异不相匹配。因此，地震 EME 异常的大小除了可能随震中距离变化之外，其信号的强度在其频谱范围内的分配可能也是不均匀的。因为宏观地看起来，在白家疃等台站上的观测仪器的频响和观测到的异常信号的频率都明显地比亚美尼亚地震的高。

由于出现异常扰动的各时段的持续时间不等，异常段之间的间隔也不尽相同。因

此,这种现象的发生过程可能是一种非线性过程,有点类似于岩石样品实验中的声发射现象。考虑到岩石破裂实验中也有电磁发射现象,推测这种现象可能与地震孕育过程中的裂纹的产生和从集以及地下水在其中的输运(Draganov *et al.*, 1991)有关系。而且,如果这种现象能够得到进一步的证实,地震前的电磁发射现象还可以用来研究地震的震源过程。

大海陀山和陡河地震前的观测结果的分析和对洛马普列塔及亚美尼亚地震的观测结果的横向对比分析都表明,距震中较近的台站与较远的台站相比,EME 异常出现的时间可能较早,这是一种十分有意思的现象。如果异常信号来自震源,这种现象可能与信号的传播机制有关;如果不是来自震源,则可能与局部地下条件的变化有关系,但这种变化应和孕震应力场的变化有关。因此,可能是一种场的变化效应。然而无论如何,上述特征却包含着地震相对台站的位置和其大小的某些信息。虽然我们还不知道它们之间的密切关系,但是如果能得到进一步地证实,就可以把它们用于地震的短临预报。

另一方面,白家疃台周围的小地震发生期间并没有引起可观测到异常的EME 现象,而且在统计白家疃台近 5 年的观测资料中,也只是在有限的几个 $M_s=5$ 以上的较近地震之前,才发现有本文论及的异常现象出现。这种现象可能意味着可观测到的 ULF 电磁发射存在一震级阈值。综合本文以及 Fraser-Smith(1990)以及 Fenoglio(1993)等对洛马普列塔地震的余震的 EME 信号的分析表明,这个震级阈值可能是 $M_s=5$ 。如果较小的地震也有电磁发射的话,现有仪器的灵敏度可能还观测不到。

遗憾的是,在近几年北京附近发生的唯一一次 $M=6$ 以上的地震之前,即山西大同地震之前,白家疃台上的 ULF 系统并没有观测到上述信号,或者真的没有,或者被一次特大的磁暴扰动信号所掩盖。对于亚美尼亚和洛马普列塔地震也存在类似的现象,即除了前面提及的台站外,设有相同观测系统的其它台站也没有获得被认为可能是地震 ULF 电磁发射前兆的信号,说明地震 EME 现象的机制并不是想象得那么简单。

参 考 文 献

- Draganov, A. B., Inan, U. S. and Taranenko, Yu. N., 1991. ULF magnetic signatures at the earth surface due to ground water flow: a possible precursor to earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1 127—1 130.
- Fenoglio, M. A., Fraser-Smith, A. C., Beroza, G. C. and Johnston, M. J. S., 1993. Comparison of Ultra-low frequency electromagnetic signals with aftershock activity during then 1989 Loma Prieta earthquake sequence. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **83**, 347—357.
- Fraser-Smith, A. C., Bernadi, A., McGell, P. R., Ladd, M. E., Helliwell, R. A. and Villare, jr. O. G., 1990. Low frequency magnetic field measurements near the epicenter of the $M_s7.1$ Loma Prieta earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1 465—1 468.
- Molchanov, O. A., Kopytenko, Yu. A., Voronov, P. M., Kopytenko, E. A., Matiashvili, T. G., Fraser-Smith, A. V. and Bernadi, A., 1992. Results of ULF magnetic field measurements near the epicenter of the Spitak ($M_s=6.9$) and Loma Prieta ($M_s=7.1$) earthquakes: comparative analysis. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 1 495—1 498.
- Fujinawa, Y. and Takahashi, K., 1990. Emission of electromagnetic adiation preceding the Ito seismic swarm of 1989. *Nature*, **347**, 376—378.