

一种频率较低的 ULF 磁扰是地震前兆吗?^{*}

李兴才 曹惠馨 任克新 郝春月

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘要 北京白家疃台的 ULF 磁感应仪投入运行以来,经常观测到一种频率比较低的 ULF 磁场扰动信号,其幅度和周期均随时间变化.由于不同于各种人为电磁源引起的干扰,所以,常常把它作为一种 ULF 地震电磁发射前兆.然而和磁照图的对比分析表明,这种磁扰信号都出现在磁暴发生期间,而且没有发现观测到这类信号没有磁暴的情形.因而,在目前的认识水平上尚不能把它作为一种 ULF 地震电磁发射前兆来看待.这种信号的主要特征是:在磁暴期间间断性地出现,每段信号出现的持续时间、信号段出现的频次和扰动幅度与磁暴的类型和磁暴的大小有关系,扰动的波形特征也与磁暴的类型有关. SC 型磁暴与 GC 型磁暴相比, ULF 磁扰的幅度较大,持续时间较长; K 指数较大的磁暴期间出现的 ULF 磁扰比 K 指数较小的磁暴期间的幅度大、频次高、持续时间长,并且扰动信号的频率多变. ULF 磁感应仪上的这种暴间磁扰的起始时间及最强信号出现的时段与磁照图上的磁暴的起始时间和最强信号出现的时段相比,不一致的居多数,相同的只有 44% 左右.扰动信号的周期从几秒到几百秒不等,强度一般介于 0.04~8 nT 之间.根据对上述信号的功率谱分析, ULF 暴间磁扰的优势频率约为 0.06 Hz,而且谐波上也有相当的能量分配.

主题词 磁暴 K 指数 ULF 暴间磁扰

引言

国家地震局地球物理研究所于 1985 年在北京白家疃台架设了一套超低频(ULF)磁感应仪,频响范围为 0.01~20 Hz,其低端基本上与磁变仪频响的高端衔接,而且由于记录器的走纸速度比磁变仪的高得多,所以能记录到比磁变仪的频响高得多的信号.4 年多的观测表明,这套 ULF 系统的记录图上经常出现一种频率较低,而且幅度和频率都随时间变化的磁场扰动信号.由于这种信号明显地不同于我们已经认识了的各种人为电磁源引起的干扰,所以常把这种信号当成一种地震 ULF 电磁发射前兆.比如,在 1991 年 3 月 26 日大同地震($M_L=6.4$)之前观测到的这种信号就非常强烈(图 3a),但多数情况是后面并不跟随地震.有趣的是大同地震前观测到的这种信号正好出现在一次强磁暴($K=9$)的发生期间,从而提示我们应对这类信号作重新分析,以寻求可能的新解释.

^{*} 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 95A0063.
1994-09-15 收到初稿,1995-01-23 收到修改稿.

1 观测系统

北京白家疃台的地理位置为 40.0°N , 116.2°E ; 地磁坐标为 28.9°N , 186.1°E , 属中低纬度上的地磁台站. 1985 年投入观测的 ULF 磁感应仪是为观测地震前的电磁发射前兆设置的. 该系统由传感器、放大器和记录器三部分组成, 配有三个独立的电源和时间服务系统, 系统的示意图由图 1 的方框图表示.

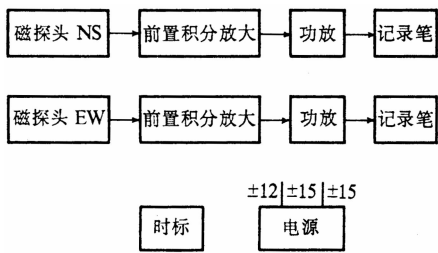


图 1 白家疃 ULF 观测系统方框图

记录部分采用线性笔头, 并自 1989 年 2 月起改用改造后的 DD-1 记录器记录, 从而使走纸速度变快 (30 mm/min), 能展示出部分信号的原始波形, 能直接分辨出 1 Hz 以内的信号, 如果再把记录放大的话, 还可以分辨出更高频率的信号, 给分析研究带来极大的方便.

2 资料分析和初步结果

观测表明, ULF 磁感应仪的正常记录曲线, 即背景水平基本上是一条直线(图 2a), 因此, 磁场的各种扰动信号在记录图上是比较容易分辨出来的. 而且经观测总结和针对性试验, 象诸如雷电、雷达、传感器附近的铁器移动等人为因素引起的电磁干扰的特征已经比较清楚了, 典型记录示于图 2b~d; 还有一种信号看上去比较规则, 和磁照图上的地磁脉动相类似(图 2e). 本文重点介绍的是另外一种信号, 正象在 1991 年 3 月 26 日大同地震前所观测到的那样, 它的幅度较大、频率较低、而且随时间变化; 虽然这种信号是在磁暴发生期间观测到的, 但又不象磁照图上的磁暴信号那样是一种连续的磁扰信号. 为此, 本文把它称之为 ULF 暴间磁扰. 有幸的是在白家疃台上还设有磁变仪, 是研究磁暴的主要观测设备. 因此, 能使我们将 ULF 磁感应仪的记录和由磁变仪获得的磁照图作一些对比分析.

由于观测系统的传感器采用 CGY-1A 型磁感应传感器, 主要由感应线圈组成, 因此仪器所观测的量是感应磁场. 传感器的灵敏度为 $280\text{ }\mu\text{V}/(\text{nT} \cdot \text{Hz}^{-1})$, 其电感量是 $2\text{ }800\text{ H}$, 固有频率为 210 Hz , 直流内阻为 $1.5\text{ k}\Omega$. 放大器采用二级积分放大, 一级功率放大, 总放大倍数为 $17\text{ }500$ 倍. 放大器的积分曲线与传感器的微分曲线相配合, 使系统的频响在 $0.01\sim20\text{ Hz}$ 内是平直的.

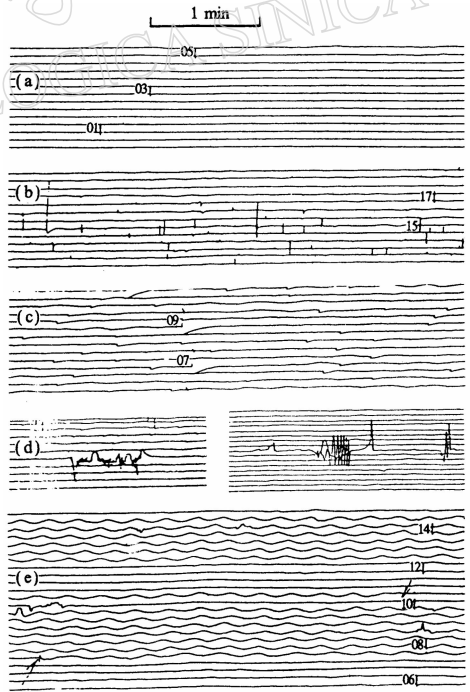


图 2 ULF 磁场感应仪的正常记录曲线、典型干扰信号和 ULF 地磁脉动的波形
(a) 正常记录曲线; (b) 雷电干扰; (c) 雷达干扰;
(d) 传感器附近铁器移动的干扰: 修理门窗(左), 修理自行车(右); (e) ULF 地磁脉动

2.1 1989~1992 年磁暴的某些统计结果

根据磁暴目录对 1989~1992 年间发生的磁暴进行了初步统计, 结果列于表 1.

在 1989~1992 年间共发生磁暴 123 次, 其中 $K = 9$ 和 $K = 8$ 的分别为 4 次和 9 次; $K = 7$ 的 30 次, 其中包括 GC 型的 3 次; $K = 6$ 的 58 次, 其中 GC 型的 19 次; $K = 5$ 的 22 次, 含 GC 型的 9 次. 从表 1 可以看出, 每年平均发生磁暴 30 次左右, 其中 $K = 6$ 的最多, $K = 7$ 的次之, $K = 9$ 的磁暴也就是强磁暴最少. 从一年内磁暴发生时间的分布看, 每年的 3, 5, 8 和 10 月份磁暴发生的频次较高、强度也较大; 1, 7 和 12 月份磁暴发生的频次较低; 另外, 较强的磁暴大多为 SC 型磁暴, GC 型的磁暴一般都比较小.

表 1 1989~1992 年磁暴统计结果

| 月份 | 1989 | | | | | | 1990 | | | | | | 1991 | | | | | | 1992 | | | | | | 合 计 |
|----|------|----|---|---|---|----|------|----|---|---|---|----|------|----|----|---|---|----|------|----|---|---|---|----|--------|
| | K | | | | | | K | | | | | | K | | | | | | K | | | | | | |
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 小计 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 小计 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 小计 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 小计 | |
| 1 | 1 | 3 | | 1 | | 5 | | | | | | 0 | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | | 1 | 7 |
| 2 | | 1 | | | | 1 | | 2 | | | | 2 | 1 | | | | | 1 | 5 | 3 | | | | 8 | 12 |
| 3 | | 2 | 3 | | 1 | 6 | 1 | 3 | 1 | | | 5 | 1 | 1 | | 1 | 3 | 1 | 1 | | | | | 1 | 16 |
| 4 | 1 | 1 | | | | 2 | | 1 | 2 | 1 | | 4 | | 1 | | | | 1 | 1 | | | | | 1 | 8 |
| 5 | | 3 | 1 | | | 4 | 3 | 1 | | | | 4 | 2 | 1 | | | | 3 | 1 | | 1 | | | 2 | 13 |
| 6 | 1 | 2 | | | | 3 | | 2 | | | | 2 | | 3 | 2 | | | 5 | 1 | | | | | 1 | 11 |
| 7 | | | | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | 2 | 1 | | | | | 1 | 4 |
| 8 | 1 | 3 | 1 | | | 5 | 1 | 1 | 1 | | | 3 | 3 | 2 | 1 | | | 6 | 2 | 1 | | | | 3 | 17 |
| 9 | 1 | 2 | 1 | | | 4 | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | | 2 | 1 | 2 | 1 | | | 4 | 11 |
| 10 | | | | 1 | 1 | | | 1 | | | | 1 | 1 | 2 | | 1 | | 5 | 1 | 1 | | | | 2 | 9 |
| 11 | | 1 | | 1 | | 2 | 1 | | 1 | | | 2 | | 3 | | 2 | | 4 | 1 | 2 | | | | 3 | 11 |
| 12 | | 1 | 2 | | | 3 | | | | | | 0 | | | | | | 0 | 2 | | | | | 2 | 5 |
| 合计 | 5 | 19 | 8 | 2 | 2 | 36 | 7 | 11 | 6 | 1 | 0 | 25 | 4 | 12 | 10 | 5 | 2 | 33 | 6 | 16 | 6 | 1 | 0 | 29 | |
| 总计 | 36 | | | | | | 25 | | | | | | 33 | | | | | | 29 | | | | | | 123 |

2.2 ULF 暴间磁扰与磁暴的关系

在 1989~1992 年发生的 123 次磁暴中, 除了因 1989 年 1 月之前 ULF 磁感应仪还未采用 DD-1 记录器记录, 以致 1 月份的 5 次磁暴没有记录到, 和另外 3 次磁暴因仪器故障缺记外, 在 ULF 磁感应仪正常工作的时期内共有 115 次磁暴可供对比分析, 这里把它作为暴间磁扰统计的基数. 表 2 给出了在此期间发生的不同类型和不同 K 指数的磁暴的次数及 ULF 磁感应仪在磁暴期间观测到暴间磁扰的磁暴次数. 为了较详细地了解 ULF 磁感应仪记录到的暴间磁扰的细节, 在表 2 中以 N_1 表示在磁暴的初相、主相、恢复相时段都观测到了 ULF 暴间磁扰信号; N_2 表示只在磁暴的初相和主相时段观测到了 ULF 暴间磁扰, N_3 表示只在磁暴的初相或主相时段观测到了 ULF 扰动信号, N_4 表示仪器在磁暴的任何时段都没有观测到这种磁扰信号等 4 种情况, N_i 和 N_u 分别是不同 K 指数的磁暴的总数和 ULF 系统观测到暴间磁扰的磁暴次数, $R_u = N_u/N_i$ 是它们的比, $R_i (i = \text{SC 或 GC})$ 表示记录到 ULF 磁扰的 SC 或 GC 型磁暴的数目与磁暴目录上相应数目的比, 在百分比一栏中带有符号 R_1 , R_2 和 R_3 栏中的数字分别表示在 ULF 仪器上于磁暴的初相、主相和恢复相时段都观测到暴间磁扰, 只在磁暴的初相和主相时段观测到暴间磁扰, 和只在磁暴的初相或主相时段观测到暴间磁扰的磁暴的次数在相应类型的磁暴总数中所占的百分比.

从表 2 可以看出, 在 4 次 $K = 9$ 的磁暴的初相、主相和恢复相时段都观测到了 ULF

暴间磁扰信号；在 $K = 8$ 的 8 次磁暴中，都观测到 ULF 暴间磁扰的只是在它们的初相和主相期间，而在恢复相期间也观测到这种磁扰信号的磁暴只有 1 次。如果不考虑 ULF 暴间磁扰是在磁暴的哪个时段观测到的，可以说在较强的磁暴 ($K \geq 8$) 发生期间 ULF 磁感应仪都能观测到暴间磁扰；30 次 $K = 7$ 的磁暴当中，观测到 ULF 暴间磁扰的磁暴为其中的 93%，但是在 $K = 7$ 的磁暴的初相和主相时段都观测到 ULF 暴间磁扰的只有 60% 左右，约 30% 只是在磁暴的初相或主相时段才观测到了 ULF 暴间磁扰，还有一部分 $K = 7$ 的磁暴 (约 10%)，在它们的任何时段都没有观测到 ULF 暴间磁扰动信号；在 $K = 6$ 和 $K = 5$ 的磁暴中，观测到 ULF 暴间磁扰动的磁暴约为它们总数的 60%，而且其中多数只是在磁暴的初相或者主相时段观测到的。

表 2 1989~1992 年 ULF 暴间磁扰记录统计表

| K | N_t | 磁暴类型及 相应次数 | 有 ULF 磁扰的磁暴数 | | | | | 百分比 (%) | | | | |
|---|-------|---------------|--------------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|-------|
| | | | N_u | N_1 | N_2 | N_3 | N_4 | R_u | R_1 | R_2 | R_3 | R_4 |
| 9 | 4 | SC 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | | 100 | 100 | | |
| | | GC 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | |
| 8 | 8 | SC 8 | 1 | 1 | 7 | 0 | 0 | | 100 | | 100 | |
| | | GC 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | | | | |
| 7 | 29 | SC 25 | 1 | 1 | 16 | 8 | 1 | | 96 | 4 | 62 | 30 |
| | | GC 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 93 | 67 | | 67 | 0 |
| 6 | 58 | SC 26 | 1 | 1 | 12 | 13 | 6 | | 79 | 3 | 36 | 40 |
| | | GC 5 | 0 | 0 | 2 | 3 | 12 | 60 | 26 | | 10 | 1 |
| 5 | 22 | SC 10 | 0 | 0 | 2 | 8 | 3 | | 77 | | 15 | 62 |
| | | GC 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 6 | 57 | 25 | | | 25 |

另外，从对磁暴的 K 指数相同但类型不同的磁暴的 ULF 磁扰的统计结果看，SC 型磁暴的 ULF 频段的磁扰比 GC 型磁暴的强而且出现的频次也高，如 $K = 6$ 的 SC 型磁暴中 72% 在暴间记录到了 ULF 暴间磁扰，而对 $K = 6$ 的 GC 型磁暴观测到 ULF 暴间磁扰的只有 29%，而且在初相和主相时段都观测到这种暴间磁扰的磁暴中 SC 型的占 33%，GC 型的只有 12%；在初相或主相时段记录到这种磁扰的 SC 型占 36%，GC 型的只占 17%。对于 $K = 7$ 和 $K = 5$ 的磁暴的观测结果也和上述情况类似。

综上所述可以得到这样的看法，在 ULF 磁感应仪上所观测到的那种频率较低的 ULF 磁扰信号与磁暴有十分密切的关系，而且与磁暴的类型和磁暴的强弱即相应的 K 指数的大小有关系。ULF 磁感应仪在较强的磁暴 (例如 $K \geq 7$) 期间几乎都观测到了 ULF 暴间磁扰，而对于比较弱的磁暴 ($K \leq 6$)，在它们发生期间观测到 ULF 暴间磁扰的磁暴所占的比例也高于 50%，尤其是其中的 SC 型的磁暴。这种对比分析结果表明，在还没有搞清楚这种较低频率的 ULF 磁扰动和地震的确切关系之前，我们是不能够简单地把它们去与地震拉上关系的，尽管有些是出现在地震之前的，否则将会造成误判。合理的思路应该是，当 ULF 磁感应仪观测到这种信号时，首先应该查看一下在此期间有没有磁暴发生，如果有而且又比较强，则它很可能是由磁暴引起的；如果磁暴比较小而观测到的扰动信号又比较强，其中或许含有某些与地震有关的信息，因为前面的统计表明，对于较小的磁暴在目前的 ULF 系统上观测到 ULF 磁扰的磁暴所占的比例是不大的，而且如果有 ULF 暴间磁扰出现，其幅度一般也比较小。当然，这种推测还需要做进一步的工作来证实。

2.3 ULF 暴间磁扰的波形特征

ULF 暴间磁扰与图 2e 所示的 ULF 地磁脉动不同，其扰动幅度较大，且幅度和频率都随时间变化。与磁照图上的磁暴信号所明显不同的是，它是一种不连续的磁场扰动信号。

4 年的观测结果表明，这一类磁扰信号虽然只有在磁暴发生期间才会观测得到，但正如表 2 所表明的，并不是在磁暴的各个时段都能观测得到，而且即使对于磁情指数 K 相同的磁暴，ULF 磁感应仪所观测到的这种不连续扰动的频次(指出现这种扰动的时间段的段数)和总持续时间也不尽相同。在有的磁暴期间，ULF 磁感应仪能断断续续地观测到 3~4 段这样的扰动，而在有的磁暴期间则只能观测到 1~2 段，有的甚至一段也观测不到。分析表明，这种频次上的差异，除了主要与磁暴的强度即指数 K 有关系外，还与磁暴的类型有关系。一般来讲，SC 型的磁暴与 GC 型的相比、相应的 K 较大的磁暴与 K 较小的磁暴相比，在前者期间 ULF 磁扰出现的频次较高、持续时间较长、强度较大，并且扰动的频率多变。

从图 3 中可以看出，不论磁暴是大还是小，暴间的 ULF 磁扰的周期和幅度都是随时间变化的。其主要区别正如前面所提及的是在 K 指数比较大的磁暴期间，扰动信号出现的频次较高、持续时间较长、幅度较大。例如 $K = 9$ 的磁暴间，ULF 扰动出现的频次一般为 3~4 次，每次扰动的持续时间约为 2~10 h，强度在 0.04~10 nT；频率较高和幅度较大的扰动大都出现在磁暴的初相和主相时段，在恢复相时段出现的磁扰其频率相对较低、幅度也较小。对于 $K = 8$ 的磁暴期间，一般都能观测到 2 次暴间磁扰动，强度在 0.2~1.5 nT 之间，持续时间为几十分钟到 6 h。对于 $K < 7$ 的磁暴，只在部分磁暴期间观测到了 ULF 磁扰，强度一般较弱，为 0.04~0.4 nT，持续时间几分钟至 1~2 h，如图 3c₁，d₁，e₁。

4 年中发生的 GC 型磁暴大都为弱磁暴或中强磁暴，在它们发生期间出现的 ULF 磁扰与相同强度的 SC 型磁暴相比，扰动的频率和幅度都较低(参见图 3c₁，d₁，e₁ 和 3c₂，d₂，e₂)。

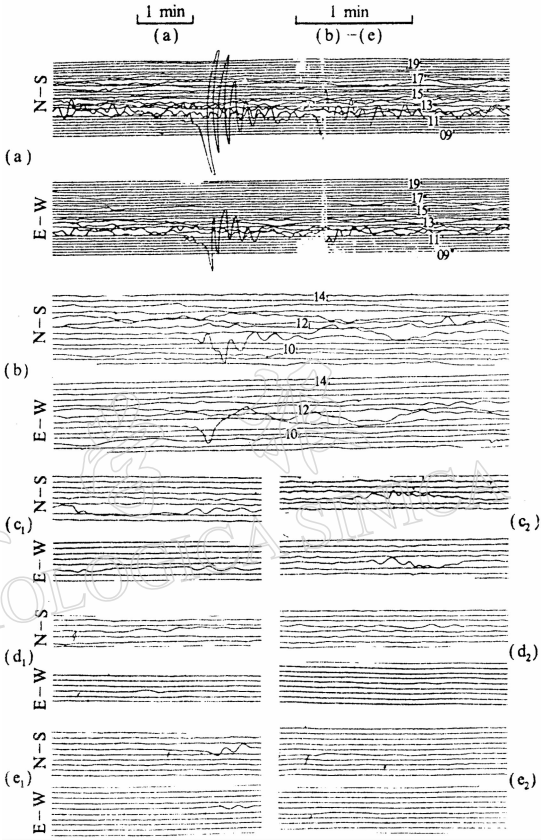


图 3 磁暴期间 ULF 磁扰信号的波形示例

- (a) 1991 年 3 月 24~27 日 SC 型磁暴($K = 9$)初相时段的磁扰；
- (b) 1991 年 6 月 12~14 日 SC 型磁暴($K = 8$)主相时段的磁扰；
- (c₁) 1989 年 8 月 14 日 SC 型磁暴($K = 7$)主相时段的磁扰；
- (c₂) 1992 年 8 月 23 日 GC 型磁暴($K = 7$)初相时段的磁扰；
- (d₁) 1989 年 8 月 9 日 SC 型磁暴($K = 6$)主相时段的磁扰；(d₂) 1989 年 8 月 20~21 日 GC 型磁暴($K = 6$)主相时段的磁扰；
- (e₁) 1990 年 8 月 1 日 SC 型磁暴($K = 5$)主相时段的磁扰；(e₂) 1991 年 10 月 6 日 GC 型磁暴($K = 5$)初相时段的磁扰

这种情况的出现可能与磁暴的类型有关系,因为 SC 型和 GC 型磁暴的起始是不相同的,而 GC 型磁暴属于缓始型的磁暴.当然,根本原因还应归因于它们产生的机制.但是,由于本文重点讨论的是电磁发射现象与地震的关系,所以这里不作讨论.

当然,总体来讲,ULF 暴间磁场扰动信号的波形是比较复杂的,不仅在类型和强度均不相同的磁暴期间,ULF 暴间磁扰信号不尽相同,就是对类型和强度都相同的磁暴,暴间 ULF 磁扰的形态也存在差异,这种情况可能与磁暴本身的复杂性有一定的关系.

2.4 ULF 图上的暴间磁扰和磁照图上的磁暴在特征时间上的差异

和磁照图上磁暴的起始时间以及磁暴的最强信号所处的时段相比,ULF 暴间磁扰的起始时间和最大磁扰出现的时段,不一致的为多数.统计表明,相同的只有 44% 左右.如

果只比较它们的起始时间,则 ULF 磁扰超前的约为 27%,滞后的约为 37%,相同的约为 36%,时间精度为分钟量级.

2.5 ULF 暴间磁扰的优势频率

我们还对 ULF 磁感应仪在本文所分析的 115 个磁暴的不同时段观测到的 ULF 暴间磁扰信号进行了功率谱分析.鉴于还将对它们作专门的讨论,所以这里只给出一些主要的特征.从图 4 中可以看出,3 个时段的 ULF 暴间磁扰信号能量分配的优势频率基本相同,约为 5.85×10^{-2} Hz,说明暴间磁扰的主要能量分布在较低的频率上,但在较高的频率,例如 $f > 1$ Hz 的频率上,ULF 暴间磁扰信号仍有一定的能量分布.如果观测仪器的频响太低,这个频率范围的磁扰信号可能观测不到.

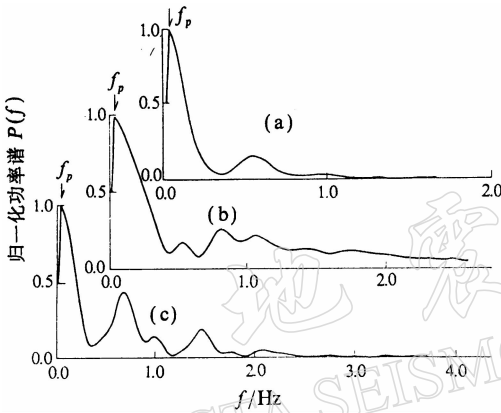


图 4 1989 年 3 月 13~15 日一次 $K=9$ 的磁暴.在初相(a)、主相(b)和恢复相(c)时段的暴间磁扰的归一化功率谱,
 f_p 为最大峰值的频率

3 结语

磁暴是太阳活动所喷射出的等离子粒

子流与地磁场相互作用的结果,是高空的强磁场活动的主要表现之一,伴随磁暴还有磁脉动.传统上研究这类磁场活动的数据大都取自自由磁变仪获得的磁照图(杨少峰等,1987;杨少峰,1992),但是,由于磁变仪的频响近于直流($0 \sim 0.1$ Hz),而且记录器的走速又低(20 mm/h),所以只能响应较低频率的信号.因此,由 ULF 磁感应仪观测到的暴间磁扰或许能为开展磁暴场在 ULF 频段特征的研究提供一些补充数据.当然我们也注意到,这里所叙及的暴间磁扰是一种不连续的磁扰信号,这种情况究竟是这种信号在 ULF 频段的本身特征,还是由于观测仪器的原因所造成的,似乎还有待进一步研究.

尽管我们还不清楚由 ULF 磁感应仪记录到的这种频率较低的 ULF 暴间磁扰为什么是一种不连续的信号,然而它们都出现在磁暴发生期间,而且只发现了在有的磁暴(特别是比较小的磁暴)期间没有观测到 ULF 暴间磁扰的情形,还没有找到观测到这类信号而没有磁暴的例子,因而它与磁暴有关系是无疑的.然而,按着本文分析所获得的认识,目前还

不能把它看作是一种地震的电磁发射前兆，否则会造成对地震的误报。当然，从前面的统计结果看，在比较小的磁暴期间观测到的 ULF 暴间磁扰的幅度一般是比较小的，所以，如果在比较小的磁暴期间观测到比较大的 ULF 暴间磁扰信号，也不能排除含有某些地震信息的可能性，但需要进一步工作来证实。

笔者对高玉芬和曾小苹同志在资料分析过程中的帮助表示感谢。

参 考 文 献

- 杨少峰，孙炜，徐宝连，1987. 与磁暴急始有关的瞬态地磁脉动. 地球物理学报, **30**(4): 450~457
杨少峰，1992. 急始磁暴期间的地磁脉动. 地球物理学报, **35**(2): 133~141

地 震 学 报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA