

云南地区中强与强烈地震 电磁辐射的观测研究*

张全喜 张明灿

(中国河南新乡 453003 中国电波传播研究所)

摘 要

通过一年之内的地震电磁辐射前兆的连续观测,总结了中等强度地震电磁辐射前兆的统计对应率及信号与地震的关系。分析研究澜沧·耿马强震序列的电磁辐射特征,并与中等强度地震的前兆进行了比较。对该前兆作为地震短临预报的可行性及应继续深入研究的有关问题作了分析。

关键词 地震电磁辐射; 地震前兆; 地震预报; 澜沧·耿马地震

一、前 言

观测地震孕育过程中所激励的电磁信息,分析其信号特征及规律,从而探索对中强以上地震的预报参数,是地震电磁前兆研究的重要内容之一。

目前许多国家的地震科学工作者对地震电磁辐射效应很感兴趣,期望利用其前兆特性实现地震的短临预报。现阶段虽然对该前兆产生的机理及辐射特性了解不多,但是从现场观测入手,总结地震电磁辐射信号与地震之间的相互关系,探讨利用其前兆实施地震预报的方法等问题,许多科学工作者作了不少工作。1980年苏联和日本联合在日本的观测(Gokhberg *et al.*, 1982),在地震发生之前的半小时到一个半小时期间内收到了电磁异常辐射信号。日本的 Yoshino 等(1985)利用环天线所测得的数据,通过矢量合成技术,多点定位获得地震的震中位置。我国也有不少单位,长期进行地震电磁前兆的观测研究工作。

为了观测地震电磁前兆信号,我们设计了以鞭天线和环天线为传感器的宽频带接收系统,在地震多发区的滇西地震预报实验场设站,在 VLF 和 ELF 频段连续观测地震电磁辐射信号,并希望获得震源的方位信息。

根据台站条件及所希望监测的区域,选定在下关闭山实验场($100^{\circ}15'11''E$, $25^{\circ}36'31''N$)和丽江地震台($100^{\circ}13'57''E$, $26^{\circ}53'57''N$)建立两个观测站。期望监测洱源、剑川一带 200 km 范围内的 5 级以上及 400 km 范围内的 7 级以上地震。

* 本工作得到地震科学联合基金会的资助。

1990 年 2 月 28 日收到本文初稿, 1991 年 7 月 25 日决定采用。

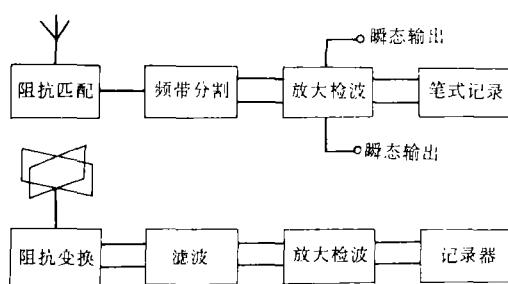


图1 观测系统框图

团山的观测系统有VLF, ELF鞭天线接收系统一套,VLF环天线系统两套, 天线平面相互正交放置。丽江的观测系统有VLF鞭天线系统一套和环天线系统两套, 环天线同样正交放置。鞭天线系统有瞬态信号输出供磁带记录, 鞭天线和环天线系统都有检波输出供笔式记录器作可显记录(张全喜等, 1989), 接收系统方框图见图1。

定期对各测量系统进行检查和校准, 以信号的场强表示测定值, 可作为定量分析研究的数据。

二、中强地震观测结果及分析

这次分析处理的资料是1987年8月至1988年7月两个站所测得的。资料处理过程是: 首先把记录曲线中认为是异常电磁辐射的信号强度和起止时间统计出来, 把确认为雷电等干扰的事件去掉。然后按实验场所公布的地震目录, 把分别距两个站的震中距在100 km范围之内的M3.0—3.9的地震事件, 及200 km范围内的M4.0—4.9地震事件和400 km范围内的M5.0—5.9地震选出。判别某次地震有无前兆的原则, 是根据笔者过去的经验和参考别人的经验(Oike et al., 1986; Li et al., 1988), 在地震发生前5天之内若有异常电磁辐射时, 即作为有相关关系来处理。

根据以上原则, 在我们观测期间共选出地震事件26个, 两站应该有前兆的地震数为42个, 实际有前兆的事件数为36个(因有停电缺资料和距离其中一站超规定的情况)。其详细情况见表1。丽江为VLF信号; 团山为ELF信号, 所以强度和超前时间不同。统计结果表明: 有前兆的占86%。其中M3.0—3.9的地震25个, 有前兆的23个, 占91%; M4.0—4.9地震13个, 有前兆的9个, 占70%; M5.0—5.9地震事件数4个, 有前兆的4个, 占100%。

图2为1988年1月10日宁蒗M₁.5.5地震的电磁辐射前兆信号。震源深度为h<10 km。图2a为丽江的VLF信号, 由图可见于1月9日06时56分出现电磁脉冲前兆异常, 持续1小时4分钟, 到08时00分结束, 发震时刻是1月10日15时43分。电磁前兆提前32小时47分钟出现, 电磁脉冲最大幅度相应的场强为62 mV/m。

图2b为团山台记录的宁蒗同一次M₁.5.5地震的信号, 接收频段为ELF。由图可见在1月9日04时56分出现异常信号, 到09时00分结束, 持续4小时4分钟。电

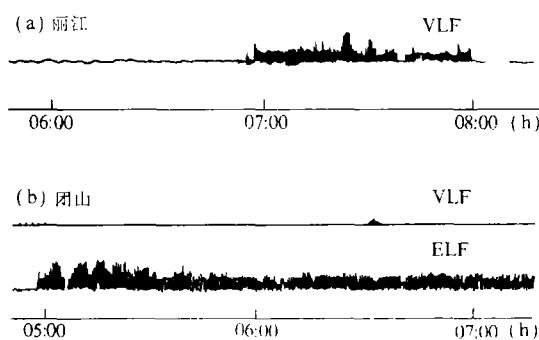


图2 宁蒗地震电磁辐射信号

磁脉冲提前 34 小时 47 分钟出现, 其相应的信号场强为 230 mV/m.

表 1 地震事件与电磁前兆统计

编 号	地震时间(BTC)		震中位置		震级 (M_L)	震中距(km)		前兆超前时间 (时·分)		前兆强度(mV/m)	
	年·月·日	时·分·秒	$\varphi_s(^{\circ})$	$\lambda_t(^{\circ})$		团山	丽江	团山	丽江	团山	丽江
1	1987.9.29	06-05-13	25.64	99.92	3.0	34	143	12·40	/	220	/
2	1987.10.3	04-27-57	27.01	101.62	4.0	306	139	16·17	/	400	/
3	1987.10.13	11-42-05	26.47	100.03	3.4	98	51	23·02	23·57	220	148
4	1987.11.12	14-54-33	26.21	100.20	3.4	66	77	/	29·14	×	64
5	1987.11.21	23-27-47	25.35	100.09	3.8	33	172	27·03	37·28	140	70
6	1987.12.12	05-15-13	27.06	100.90	3.7	174	69	/	69·35	/	64
7	1988.1.10	15-43-15	27.17	100.82	5.5	182	65	34·47	32·47	230	62
8	1988.1.12	23-32-43	27.44	101.02	3.6	217	99	66·42	43·37	180	80
9	1988.1.15	21-55-53	27.28	101.01	3.5	199	87	37·59	28·56	260	24
10	1988.1.17	19-40-13	27.26	101.07	3.5	200	92	/	37·38	/	64
11	1988.1.26	05-37-00	25.38	100.06	3.8	32	169	51·07	/	150	/
12	1988.1.30	00-22-03	27.27	101.98	4.1	198	85	10·22	×	300	×
13	1988.2.2	02-11-32	26.29	103.02	4.0	287	286	16·01	/	180	/
14	1988.2.25	03-16-58	27.70	101.22	4.1	251	132	38·17	18·27	140	70
15	1988.3.20	03-42-18	27.18	100.40	4.1	175	35	42·22	×	180	×
16	1988.3.22	10-13-04	26.65	100.77	3.3	127	60	23·13	×	310	×
17	1988.3.30	06-06-37	27.36	101.19	4.1	215	107	19·09	6·6	120	×
18	1988.4.15	01-53-19	26.21	102.40	4.3	225	229	6·33	5·53	130	84
19	1988.4.15	13-58-13	26.33	102.99	5.5	282	286	18·38	17·58	130	84
20	1988.4.28	09-36-22	26.28	100.08	3.0	77	70	48·54	83·16	120	40
21	1988.4.29	18-47-13	26.46	99.85	3.8	103	62	80·17	10·07	120	60
22	1988.5.3	05-21-32	25.31	102.17	3.2	196	262	40·07	15·21	90	140
23	1988.5.20	06-43-52	25.33	100.10	3.0	34	174	118·44	/	420	/
24	1988.5.24	23-39-14	25.59	101.21	4.2	239	123	/	×	/	×
25	1988.6.8	00-09-00	25.34	100.01	3.8	39	174	103·24	/	230	/
26	1988.6.25	04-44-01	27.38	100.56	3.9	199	62	/	7·44	/	24

注: 表中 × 表示缺资料或未记到前兆; / 表示超过范围未予统计.

图 3 为丽江台记录的 VLF 频段的地震电磁辐射信号, 对应于 1988 年 1 月 17 日 19 时 46 分宁蒗 $M_L 3.5$ 地震, 震源深度 $h < 5 \text{ km}$. 由图可知, 信号于 1 月 16 日 07 时 02 分出现, 08 时 06 分结束, 持续 1 小时 4 分钟. 最大幅度相应的场强为 65 mV/m, 前兆信号提前 36 小时 44 分钟.

根据多年来对地震电磁辐射前兆的研究和现场观测资料的分析, 我们有如下粗浅看法:

1. 尽管地震电磁辐射前兆频谱很宽, 但由于信号穿透基岩和地表覆盖层传播时遭受很大的衰减, 而且衰减率随频率增高而增加得很快. 所以, 利用地震电磁辐射前兆预报

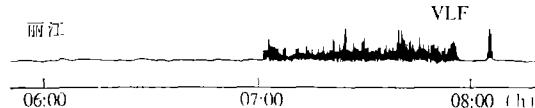


图 3 宁蒗 $M_L 3.5$ 级地震信号

地震,最有希望的频段应是 VLF 和 ELF 频段,特别是 ELF 频段.从宁蒗 M_L 5.5 地震的信号记录情况看,ELF 频段能接收到距接收台站 200 km 处 5 级地震的信号.

2. 中强地震的电磁辐射前兆一般提前数小时至数十小时.在所选的震例中,平均数为 36 个小时.这与 Mactov 等(1986)所得的特征值 48 小时基本上是一致的.在地震时刻很少收到电磁辐射信号,即便有也很弱(参见图 6a).另外发现前兆的提前时间与震级、观测频段有关.震级越大,频段越低,其前兆提前时间越早.

3. 从团山所记录的 VLF, ELF 信号规律看,一般 ELF 信号先出现,然后 VLF 信号出现,当其结束后 ELF 仍保持.这个序列过后平静一段时间则地震发生.远震以 ELF 信号突出;近震则 VLF 信号也明显.

三、一次强震序列观测结果及分析

1988 年 11 月 6 日,我国云南省西南边境上的澜沧·耿马一带相继发生 M_s 7.6 和 M_s 7.2 强烈地震,其主要地震参数为:

1988 年 11 月 6 日 21 时 03 分 14.5 秒, $22^{\circ}50' N, 99^{\circ}43' E$, 澜沧西北战马坡, M_s 7.6, $h = 13$ km; 1988 年 11 月 6 日 21 时 15 分 44.9 秒, $23^{\circ}23' N, 99^{\circ}36' E$, 耿马·沧源以东, M_s 7.2, $h = 10$ km. 其前震发生于 8 月 15 日 $M_L = 5.1$. 主震过后至 12 月 6 日, 地震台网观测统计,仅一个月内就发生 $M_s \geq 6.0$ 地震 7 次, $M_s \geq 5.0$ 地震 10 次, $M_s \geq 4.0$ 地震 98 次, 地震仪所能记到的地震达数千次之多. 我们的下关团山观测站距 M_s 7.6 地震震中距离为 318 km; 距 M_s 7.2 地震距离为 260 km. 丽江观测站距这两次地震的距离分别为 455 km 和 396 km. 两个观测站从 8 月份开始,均收到不同于实验场区近震的电磁辐射信息.

耿马·澜沧一带地壳厚度约 38~40 km,这次地震的两个主震的震源深度分别为 13 km 和 10 km,属浅源地震.根据地质资料,两个震中线以西主要为前奥陶纪变质岩,以东主要为花岗岩岩基.地震电磁辐射的机理之一是由于地震孕育过程中,地壳岩层微破裂时,岩层所承受的应力变化,岩层介质所具有的压电效应等机电转换形成电偶极子或电荷的运移,从而辐射出电磁能量.据资料介绍(Гончаров et al., 1980),特别是花岗岩中所含石英成份丰富时,其压电效应更为明显.所以这次地震具有电磁辐射前兆的地质条件.

1. 环天线系统接收信号特征

自从 1987 年 8 月建站以来,周围数百 km 范围内所发生的地震最大为 5.5 级,环天线系统所收到的信号都很小.但在这次澜沧·耿马地震序列中,环天线系统的反应比较大,特别是距震中较近的团山站更明显.

其记录曲线特征是:基础电平上升,并伴随有起伏出现.持续时间长者可达 10 多小时甚至更长,短者只有 1 小时甚至更短.环天线所响应的方向为感应磁场方向,由图 4b, d 可见环 1 比环 2 的响应高,环 1 的环面方向是南北向.震中在观测站南偏西方向.

通常情况下,环天线电平首先抬高,尔后鞭天线系统出现信号.当鞭天线收到的辐射信号结束后,环天线的电平仍未降至正常值,但在地震将要发生之前,环天线电平突降至正常值,这点可由图 4 中 8 月 15 日、11 月 6 日的地震前记录曲线中看出.最典型的例子是在丽江台上,11 月 28 日 12 时 20 分电平抬高,11 月 30 日 12 时 42 分电平突降,30 日 16

时 13 分发生了这次地震序列中最大的 $M_s 6.7$ 余震.

2. 鞭天线信号特征

这次澜沧 - 耿马地震, 其前震少, 且提前的时间长. 主震发生在 11 月 6 日, 而前震发生于 8 月 15 日 ($M_L 5.1$), 此后再无较强的前震. 前兆信号出现得更早. 图 5 为团山测得的鞭天线信号, 出现于 8 月 5 日 1 时前后. 其信号最强时持续 10 多分钟, ELF 场强为 712 mV/m , VLF 场强为 250 mV/m , 磁场强度为 0.51 mA/m .

从 8 月 5 日至 11 月 6 日主震发生时止, 其间断断续续经常有电磁辐射信号. 8 月 14 日 12 时 25 分, 感应磁场电平突然升高, 于 15 时 40 分收到 ELF 和 VLF 信号, 且感应磁场仍处于高电平. 当磁场突降至正常值后, 8 月 15 日发生了 $M_L 5.1$ 前震. 11 月 3 日的信号变化规律也是如此(图 4 a, b 和图 4 c, d), 这是主震前的信号, ELF 场强为 400 mV/m , VLF 为 40 mV/m , 磁场强度为 0.39 mA/m .

主震发生时刻的信号很弱, 图 6 a 为丽江台测得的信号. 主震过后, 所发生的一系列余震过程中, 其电磁辐射能量大大下降, 几乎没有收到什么明显信号. 只有在发生较晚的余震如 11 月 27 日的 $M_s 6.3$, 11 月 30 日的 $M_s 6.7$ 和 12

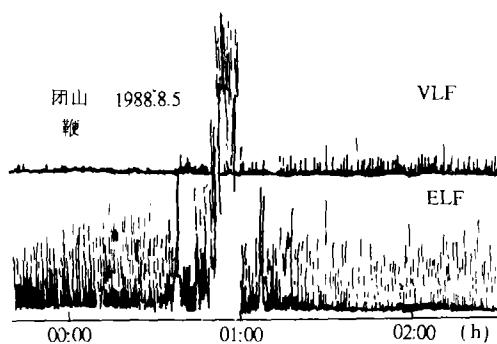


图 5 最早出现的前兆信号

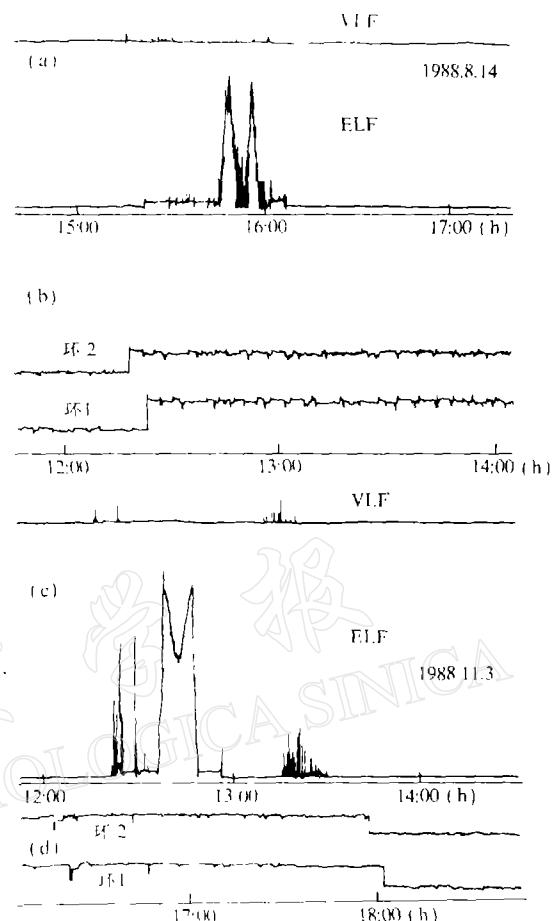


图 4 (a),(b) 1988 年 8 月 15 日 $M_L 5.1$ 鞭、环天线收到的前兆信号.(c),(d) 1988 年 11 月 6 日澜沧 - 耿马地震前鞭、环天线记录的信号

月 8 日的 $M_s 6.1$ 中强震之前, 观测系统反应又比较明显. 图 6 b 为丽江台收测的 11 月 30 日 $M_s 6.7$ 强余震前兆信号.

3. 澜沧 - 耿马地震序列的信号特点

(1) 强震的电磁辐射前兆出现早, 这次地震前兆于 8 月 3 日就开始出现. 对主震来说提前 95 天, 对前震来说也提前了 12 天, 这是过去没有碰到过的.

(2) 由于这次地震为强震, 信号形态也不同于过去. 从记录曲线看, 在密集的脉冲簇中有单峰或双峰包络形成,

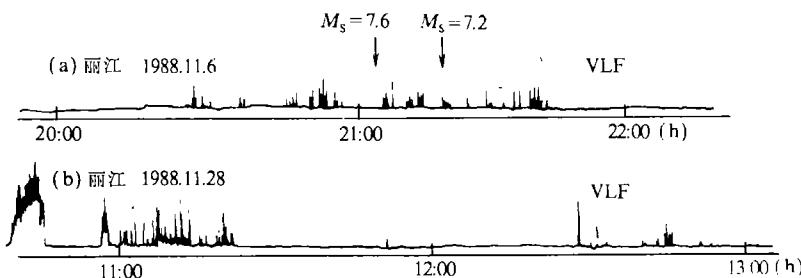


图6 震时(a)及余震(b)信号.“ \downarrow ”表示地震时刻

如图5、图4a和图4c说明强震孕育过程中有更强烈、更为密集的电磁脉冲发射.

(3) 序列中的信号强度分布:前震的前兆信号最强,即8月5日(图5)的信号.主震前的信号次之,即11月3日(图4c).震时信号很弱(图6a).余震信号强度随着震后时间的增长由弱逐渐加强,直至与所发生地震的震级相当(图6b).

四、强震与中强震该前兆的不同特征

(1) 强震的电磁辐射前兆比中强震提前时间更长. $M_{3.0}-5.5$ 的地震事件的统计结果为36个小时;而这次强震在主震前95天,前震前12天就收到前兆信号.

(2) 环天线系统对感应磁场反应明显,表现为电平升高并伴有起伏,且符合感应场的方向性响应;而中强震的磁场反应不明显,说明强震辐射更强.

(3) 强震电磁辐射电场信号有单峰或多峰包络形式,而 $M_{5.5}$ 以下的地震事件中没有发现此特征.

(4) 强震的电磁辐射信号持续时间比中强震长,而且是多次重复出现.

五、想法与建议

地震电磁辐射前兆对地震短临预报具有十分重要的意义.该前兆特点适宜于地震的短临预报.滇西地区观测结果:(1)对5级以上地震基本上都能测得前兆信号.我们统计的结果表明,200 km范围内4级以上地震的对应率为70%,5级以上地震的对应率为100%;(2)前兆提前时间,中强震统计为30多个小时,澜沧·耿马地震为3个月,适用于短临预报.

根据滇西地区观测经验,我们认为应加强对该前兆以下几个方面的探索研究:

1. 开展该前兆定位方法的研究,从理论上研究辐射源的场结构,寻求可靠的定位方法;
2. 地震时刻与前兆时间及观测频段的关系.统计不同震级与前兆时间的相依关系,最好能给出经验公式.我们发现由于观测频段的不同,前兆时间也有不同.
3. 前兆信号强度与震级的关系.应当将源强度与震级联系起来,考虑介质的影响.

总之,对于地震预报来说,电磁辐射前兆是一种很有前途的前兆手段.

本文得到滇西地震预报实验场团山、丽江地震台的大力支持与协作,在此深表感谢.

参 考 文 献

- 张全喜, 张明灿, 王昭明, 1989. 地震电磁辐射观测研究, 震前电磁波观测与实验研究文集, 112—119.
- Gokhberg, M. B. and Morgounov, V. A., 1982. Experimental measurements of electromagnetic emissions possibly related to earthquake in Japan. *J. Geophys. Res.*, 87, B9, 7824.
- Li, Y. T. and Gao, Y., 1988. Observation of the EM signals prior to the earthquake events. *International Symposium on Radio Propagation*, 48—50. Beijing.
- Oike, K. and Ogawa, T., 1986. Electromagnetic radiations from shallow earthquakes observed in the LF range. *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 1011—1014.
- Yoshino, T., 1980. The possibility of using a direction finding technique to locate earthquake epicenters from electromagnetic precursor radiation. *Annales Geophysicae*, 3, 6, 727—730.
- Гончаров, А. И., Коряков, В. П., Куэнцов, В. М., Либин, В. Я., Лившиц, Л. Д., 1980. Акустическая эмиссия и электромагнитное излучение при Оллю-основном сжатии. *ДАН СССР*, 255, 821—824.
- Мастов, Ш. Р., Рыбаков, Б. С., Грузина, Э. Э., 1986. Статистический метод краткосрочного прогноза времени корового землетрясения по импульсной электромагнитной активности. *Физика Земли*, №. 5, 72—75.