

姚丽, 陈化然, 何宇飞. 2013. 玉树地震前电离层 VLF 信号信噪比变化. 地震学报, 35(3): 390-399.
Yao Li, Chen Huaran, He Yufei. 2013. The signal to noise ratio disturbance of ionospheric VLF radio signal before the 2010 Yushu $M_{\text{S}}7.1$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 390-399.

玉树地震前电离层 VLF 信号信噪比变化^{*}

姚丽^{1,2,*} 陈化然² 何宇飞²

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心

2) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 2010年4月13日23点49分38秒(世界时),青海省玉树县发生了 $M_{\text{S}}7.1$ 地震。根据法国DEMETER卫星电场探测仪(ICE)实验数据,研究震区上空半径500 km范围内电离层10—20 kHz甚低频(VLF)电场频谱信噪比发现,玉树地震前3个不同频率的地面VLF发射站信号对应的信噪比均出现相同的变化特征,即震前DEMETER卫星1个重访周期内的平均信噪比明显减弱,而2009年相同时段和区域的平均信噪比并未出现相似变化趋势。分析认为,玉树地震孕震期信噪比衰减现象很可能是由地震-电离层耦合所致。

关键词 玉树地震 DEMETER 卫星观测 VLF 电场频谱 信噪比

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.010 中图分类号: P352 文献标志码: A

The signal to noise ratio disturbance of ionospheric VLF radio signal before the 2010 Yushu $M_{\text{S}}7.1$ earthquake

Yao Li^{1,2,*} Chen Huaran² He Yufei²

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In Yushu, Qinghai province, a strong earthquake took place at 23:49:38 UT on April 13, 2010, with a magnitude $M_{\text{S}}7.1$. Based on ICE experiments onboard the DEMETER satellite, the VLF signal in 10—20 kHz radiated by three ground transmitters and received on board of DEMETER satellite revealed the attenuation of the signal to noise ratio averaged value in the region with a radius of 500 km from the earthquake epicenter in a revisited period of DEMETER just prior to the mainshock. On the other hand, there were no similar phenomena in 2009; on the contrary we found an ascending SNR in the corresponding time interval and spatial position. These ionospheric anomalies before the Yushu earthquake are highly regarded as resulting from the seismo-ionospheric coupling.

Key words: Yushu earthquake; DEMETER satellite observations; VLF electric field spectrum; signal to noise ratio

* 基金项目 公益性行业科研专项“卫星 VLF 信噪比背景及地震异常特征研究”(201008007-04)和国家科技支撑项目(2012BAK19B02-03)资助。

收稿日期 2012-07-03 收到初稿, 2012-12-10 决定采用修改稿。

^{*} 通讯作者 e-mail: yl@seis.ac.cn

引言

卫星接收到的地面 VLF 发射站的信号数据, 过去经常被用于研究 VLF 传播及 VLF 波与电离层等离子体相互作用过程(Inan, Helliwell, 1982). Molchanov 等(2006)首次把该数据应用到地震-电离层耦合研究领域。他们利用 DEMETER(detection of electro-magnetic emission transmitted from earthquake regions) 卫星接收到的 4 个 VLF 发射站信号, 对每个发射站附近的地震进行研究, 发现系列地震(位置和时间都比较接近的几次地震)发生期间震中上空电离层区域的信噪比(SNR)降低, 并且震级越大, 受地震影响的 SNR 降低的空间区域越大。此后, 何宇飞等(2009)将 Molchanov 等(2006)的方法应用于远离 VLF 发射站的地震研究。他们利用 DEMETER 卫星接收到的多个地面 VLF 发射站信号, 对 2008 年 5 月 12 日汶川地震进行分析, 发现在地震震中上空 500 km 范围内, 多个 VLF 发射站信号 SNR 在震前一个月同时有所减弱, 排除磁暴、磁层亚暴等源于空间的扰动, 他们认为震前 SNR 降低现象很可能由地震孕育期地震-电离层耦合所致。

Molchanov 等(2006)主要关注地震发生期间(例如上述系列地震中发生第一次地震与最后一次地震之间的时间间隔)的 SNR 相对震前和震后的变化, 未能给出 SNR 在地震孕育过程中随时间的演化特征。而何宇飞等(2009)虽然给出了地震孕育期 SNR 衰减开始的时间, 但由于采用了较长时间段(约 40 天)的平均值, 又有可能掩盖了一些更短时间尺度的电离层异常。因此, 本文利用 DEMETER 卫星 VLF 电场频谱数据, 对 2010 年 4 月 13 日玉树地震孕震期 DEMETER 卫星每个重访周期(14 天)的 VLF 信号的 SNR 进行研究, 以期得到地震孕育期地震-电离层耦合过程随时间的演化特征。

1 数据

DEMETER 卫星是法国于 2004 年 6 月 29 日发射的一颗专用于监测地震电磁活动的小型卫星。卫星采用准太阳同步圆形轨道, 轨道倾角 98.3°, 高度 710 km(2005 年 12 月中旬降为 660 km), 轨道重访周期为 16 天(2008 年 5 月之后变为 14 天), 即每隔 16 天卫星轨道会回到原来轨道处。其轨道分为升轨和降轨, 分别用子轨道号 1 和 0 表示, 对应的磁地方时分别为 22:30 和 10:30。由于受太阳活动影响, 日侧轨道的空间接收带比夜侧轨道的小, 因此本文主要使用夜侧轨道数据。文中主要使用的是由搭载在卫星上 ICE (Erthelier *et al.*, 2006) 测量的 VLF 频段电场 E_{12} 分量(垂直于卫星轨道面)的功率谱, 其频率分辨率为 19.5 Hz, 频率范围为 19.5 Hz—20 kHz, 时间分辨率为 2 s。

2 研究背景

2010 年 4 月 13 日 23 点 49 分 38 秒(世界时), 我国青海省玉树县发生了 $M_s7.1$ 地震, 其震源位置为 33.1°N、96.7°E, 震源深度为 10 km。图 1 以 2010 年 4 月 9 日经过震中上空的 30880_1 半轨为例, 给出了震前 VLF 电场频谱的变化, 颜色表示电场频谱值, 从蓝色到红色表示频谱值从小到大。从该图可以看出, 10—20 kHz 之间, 有多条能量较强的谱线, 其频率对应于地面 VLF 发射站信号频率(表 1), 特定频率谱线的强度随着经纬度的不同而变化。

特定位置的某一频率频谱强度也会随时间的变化而不同, 导致这些变化的源可能来自

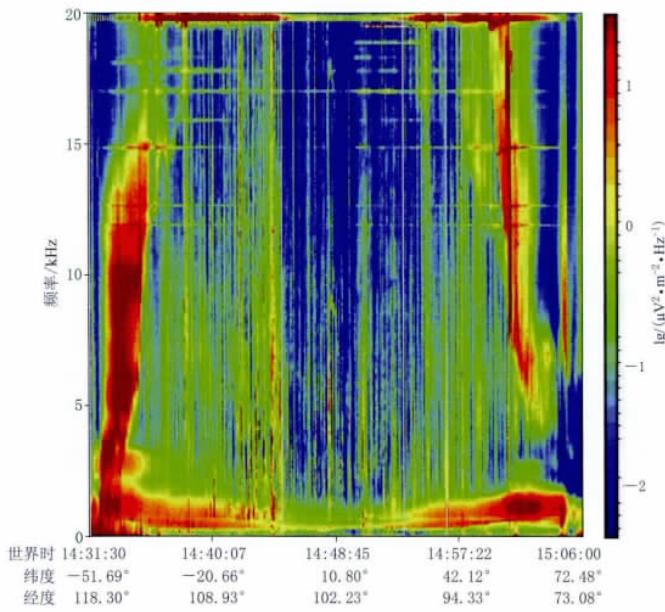


图 1 2010 年 4 月 9 日 DEMETER 卫星 30880_1 半轨的 VLF 电场频谱

Fig. 1 The VLF electric field spectrum of DEMETER satellite
30880_1 half-orbit on April 9, 2010

表 1 中国周边的 VLF 发射站特征

Table 1 Characteristics of some VLF transmitters around China

国家	发射站	频率/kHz	纬度/°N	经度/°E
澳大利亚	NWC	19.80	-21.80	114.20
印度	VTX	18.20	8.47	77.40
日本	JP	17.80	~32	~130
俄罗斯	RA1	11.9 12.65 14.88	50.34	136.58
俄罗斯	RA3	11.9 12.65 14.88	50.04	82.58

空间或地面。如果能够排除地磁、太阳活动等引起的扰动，就可以研究磁静时受地面/地震影响而产生的频谱信号的异常变化。本文通过限制 K_p 指数值排除引起电离层变化的主要空间非震扰动源，我们设定的磁静条件为： $K_p < 4$ 。

3 数据分析

本文采用 Molchanov 等(2006)的 SNR 计算公式

$$\text{SNR} = \frac{2A(F_0)}{A(F_+) + A(F_-)} \quad (1)$$

式中， F_0 ， F_+ ， F_- 分别为所提取信号及其上下限频率； A 表示频谱幅度。这些参量的值主要依赖发射站的功率和接收点的位置。在发射站附近， F_0 等于发射站频率；但远离发射站的位置， F_0 会偏离发射站频率值。我们通过研究一定区域内 SNR 在一段时间的平均值来确定不同信号的 F_0 ， F_+ 和 F_- 。

图 2 为 2010 年 2 月 8 日—3 月 12 日磁静条件下经过研究区域 10° — 50° N， 70° — 120° E

的 DEMETER 卫星平均电场功率谱随频率变化的曲线。图中用虚线标记出了表 1 所列的发射站频率位置, 实线分别标出了相应发射频率的上下限 F_+ 和 F_- 。由该图可以看出, 在相应发射站频率处, 频谱信号显著增强, 并且信号越强, 频带越宽。有些信号受其它信号干扰, 很难确定其上下限频率。我们能准确确定的信号及其上下限频率有: NWC 发射站 $F_0 = 19.77 \text{ kHz}$, $F_- = 19.4 \text{ kHz}$; JP 发射站 $F_0 = 17.78 \text{ kHz}$, $F_- = 17.6 \text{ kHz}$, $F_+ = 17.95 \text{ kHz}$; RA 发射站 $F_0 = 11.9 \text{ kHz}$, $F_- = 11.8 \text{ kHz}$, $F_+ = 11.95 \text{ kHz}$ 。需要说明一点, 由于 NWC 发射站信号不能确定其上限频率 F_+ , 其 SNR 计算公式简化为 $\text{SNR} = A(F_0)/A(F_-)$ 。下面我们将主要研究这 3 个发射信号的 SNR。

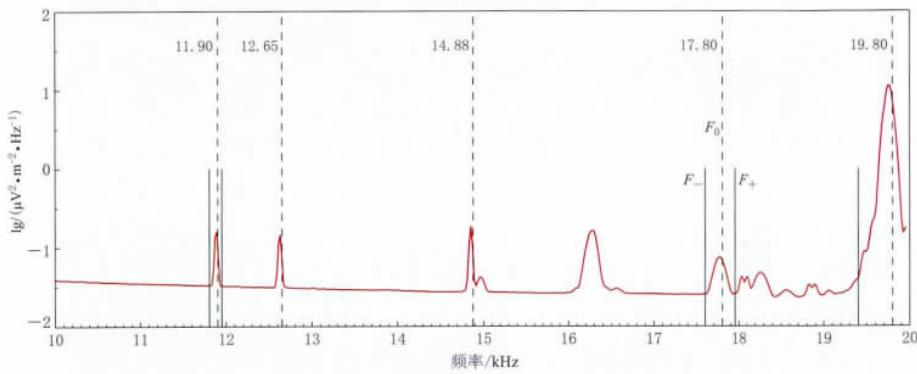


图 2 玉树地震前电场频谱随频率平均变化曲线(2010-02-08—2010-03-12)

Fig. 2 Average variance curve of electric field spectrum changing with frequency prior to the Yushu earthquake (February 8, 2010—March 12, 2010)

磁静条件下, 对于 NWC, RA 和 JP 中的每一个发射信号, 我们均计算了其震前约两个月内的 SNR, 并把计算结果按轨道展示在地图上对应的位置。由于 DEMETER 卫星一天内相邻两轨在中纬度地区的距离超过 2000 km, 如果没有轨道数据缺失, 需追踪卫星 1 个重访周期才可使相邻两轨在经度上的距离缩小至 100—200 km。在以往的研究中, 为了保证不同时段的研究区域内轨道分布均匀, 往往采用较长的时间段给出一幅 SNR 分布图(比如震前 45 天给出一幅图), 这样有可能掩盖了一些更小时间尺度的 SNR 扰动。本文所研究时段内, DEMETER 卫星轨道数据基本没有缺失, 并且地磁活动比较弱, 磁静条件限制剔除的也只是个别轨道, 因此使得我们能够通过对震前的每一个重访周期绘制一幅

表 2 玉树地震前 DEMETER 卫星 5 个重访周期的时间信息

Table 2 The time information of DEMETER satellite five revisited periods just before the Yushu earthquake

周期序号	日期 月-日
T_1	02-08—02-20
T_2	02-21—03-05
T_3	03-06—03-18
T_4	03-19—03-31
T_5	04-01—04-13

SNR 分布图, 研究震前 SNR 随时间的演化规律。需要说明的是, 由于磁静条件的限制, 2010 年 4 月 5 日和 7 日经过玉树上空的磁扰轨道被剔除, 以及 4 月 12 日 DEMETER 轨道数据的缺失, T_5 期间玉树上空 500 km 范围内总计有两条轨道缺失, 对这两条缺失轨道我们利用其空间临近轨道数据插值获得。作为对比, 我们也计算了 2009 年相应时间段的 SNR。文中所研究的 5 个重访周期 $T_1—T_5$ 的时间信息见表 2。例

如重访周期 T_1 对应的时间段为 2010 年 2 月 8—20 日。

图 3 给出了 2010 年 2 月 8 日—3 月 12 日磁静条件下 RA 发射站信号 SNR 的计算结果。由该图可以看出，玉树地震位于发射站信号接收带上。

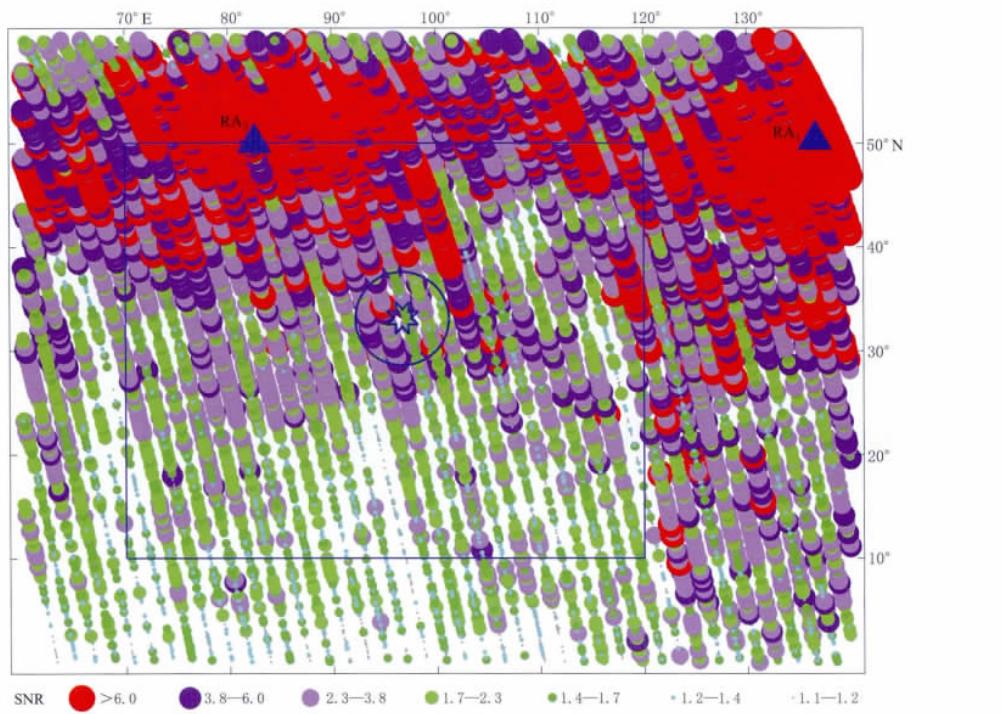


图 3 2010 年 2 月 8 日—3 月 12 日 RA 发射站信号信噪比分布
蓝色三角形表示发射站 RA_1 和 RA_3 的位置, 蓝色星号表示玉树地震震中,
蓝色大圆圈表示距离震中 500 km 的范围, 蓝色矩形框表示研究区域范围

Fig. 3 The SNR distribution for RA transmitter signal during the time interval from February 8 to March 12, 2010

Blue triangle indicates the location of transmitters RA_1 and RA_3 , blue star indicates the epicenter of Yushu earthquake, and blue circle and rectangle define the area with epicentral distance of 500 km and the research region, respectively

图 4 给出了 2010 年玉树地震前 T_1-T_5 每个重访周期内 RA 发射站信号的 SNR 分布, 距离震中 500 km 范围内 T_1-T_5 的平均 SNR 值分别为 2.1, 1.5, 2.4, 1.8 和 1.3。由该结果可以看出, T_3-T_5 的 SNR 逐渐减弱。这种震中附近震前 SNR 减弱的现象, 可能是地震引起的, 也可能是该区域电离层随时间的自然变化规律。为了寻求该区域 SNR 的随时间演化的背景特征, 我们考察了相同区域没有地震发生的 2009 年 T_1-T_5 的 SNR 变化情况(图 5), T_1-T_5 的平均 SNR 值分别为 2.1, 1.5, 1.9, 1.3 和 1.4。结果显示, T_3-T_4 的 SNR 减弱, 这与 2010 年的变化规律相同; 而从 T_4 到 T_5 的 SNR 增强, 这与 2010 年的变化趋势相反。JP 和 NWC 信号 SNR 的变化趋势与 RA 的相同, 即震前也出现了 SNR 减弱现象。以上地震和背景比较结果说明, 2010 年玉树地震前, T_3-T_4 的 SNR 下降可能是由该区域背景变化引起的, T_4-T_5 的 SNR 减弱很可能是由地震引起的。

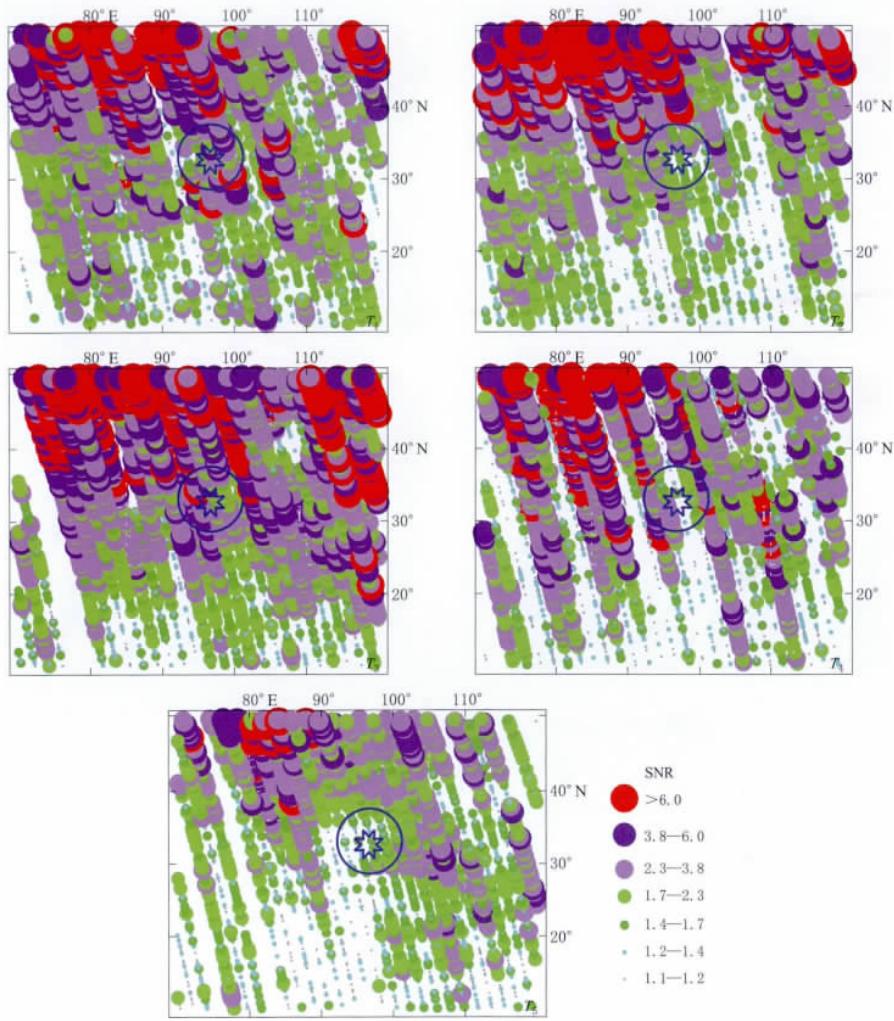


图 4 2010 年玉树地震前 DEMETER 卫星 5 个重访周期的 RA 发射站信号信噪比分布
蓝色星号表示玉树地震震中, 蓝色大圆圈表示距离震中 500 km 的范围, 频率为 11.90 kHz

Fig. 4 The SNR distribution for RA transmitter during the DEMETER satellite five revisited periods just before the occurrence time of Yushu earthquake in 2010

Blue star indicates the epicenter of Yushu earthquake, and blue circle defines the area with epicentral distance of 500 km, the frequency is 11.90 kHz

4 讨论

图 6 给出了 2009 年和 2010 年 DEMETER 卫星每个重访周期的平均 SNR, 断点是由 DEMETER 卫星数据缺失所引起的。每年共计有 28 个重访周期, 每年 SNR 呈现明显的季节变化特征。地磁夏季(5—8 月, 图中约为 T_{10} — T_{20} 期间)SNR 显著低于其它时段, 两年的年变规律相似。综观 SNR 较强时段内的变化曲线, 除个别周期(T_2 , T_3)外, 两年变化趋势有很好的一致性, 因此在研究 2010 年玉树地震 SNR 变化特征时采用 2009 年相应时段的 SNR 作为背景较为合理。

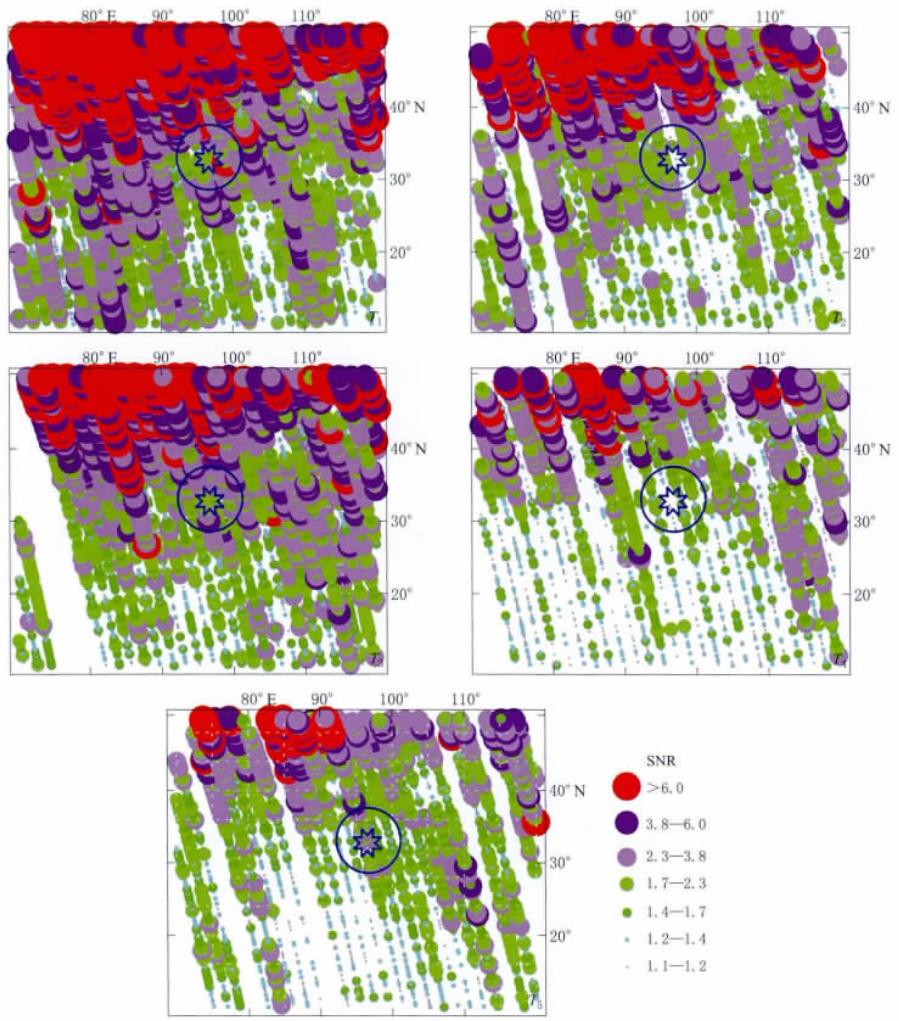


图 5 2009 年玉树区域 DEMETER 卫星 5 个重访周期的 RA 发射站信号信噪比分布
 蓝色星号表示玉树地震震中, 蓝色大圆圈表示距离震中 500 km 的范围, 频率为 11.90 kHz

Fig. 5 The SNR distribution for RA transmitter during the DEMETER satellite five revisited periods in Yushu region in 2009
 Blue star indicates the epicenter of Yushu earthquake, and blue circle defines the area with epicentral distance of 500 km, the frequency is 11.90 kHz

玉树地震前 5 个重访周期(2 月 8 日—4 月 13 日)在图 6 中由两条虚竖线标示出。该段位于 SNR 年变曲线较强时段, 尽管这期间 SNR 起伏较大, 但在 2 月 8 日—3 月 31 日期间 2009 年和 2010 年的 SNR 变化趋势非常一致; 而在最接近玉树地震的 4 月 1 日—4 月 13 日期间, 2009 年和 2010 年的 SNR 变化趋势则截然相反, 2010 年减弱而 2009 年增强。该 SNR 衰减现象很可能与玉树地震孕育过程有关。

2008 年 5 月 12 日汶川 $M_{\mathrm{S}} 8.0$ 地震(103.4°E , 31°N)也位于 RA 发射站信号接收带上, 我们考察了其震前 DEMETER 卫星 5 个重访周期(这里的重访周期为 16 天)的 SNR 变化

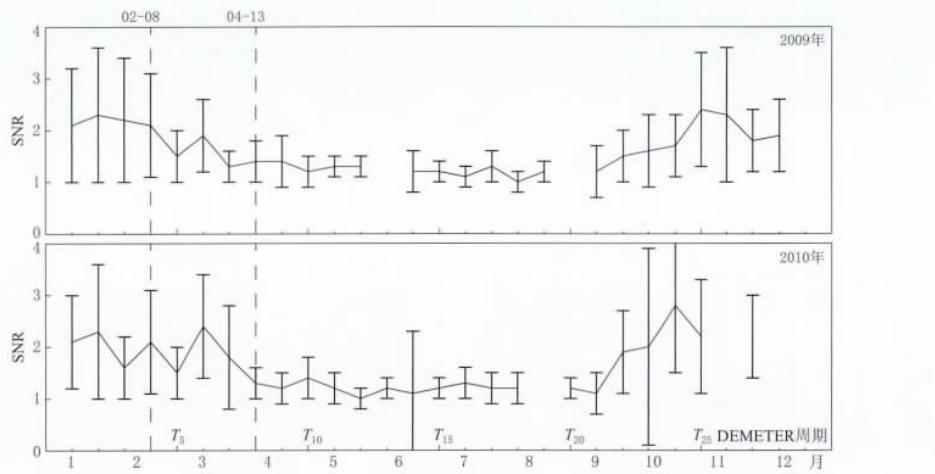


图 6 2009 年和 2010 年 DEMETER 卫星每个重访周期平均信噪比及其统计误差分布(RA 发射站)

Fig. 6 Averaged SNR and its standard deviation during DEMETER satellite each revisited period in 2009 and 2010 (RA transmitter)

情况,发现距离震中 500 km 范围内平均 SNR 值(RA 发射站: 2.4, 1.9, 1.6, 1.6, 1.3),从 T_4-T_5 , 即震前 DEMETER 卫星 1 个重访周期明显减弱, 而作为背景的 2007 年相应时段的 SNR 值(RA 发射站: 1.7, 2.0, 1.8, 1.4, 1.9)则未出现类似的变化趋势。这一结果与玉树地震的结果一致, 即震前 SNR 均出现了减弱现象。

为了凸显 SNR 的时间演化规律而不考虑 SNR 值的具体大小, 我们在图 7 中给出了归一化 SNR 的时序变化及其误差分布(图 7a, b, c), 以及同一个频率信号 SNR 不同年份间的差值(DSNR)(图 7d, e, f)。其中, 图 7a 中实曲线表示 JP 发射站 2010 年玉树地震前 T_1-T_5 的归一化 SNR, 黑色短竖线为相应 SNR 平均值的误差棒, 这里的归一化 SNR 是指每个 SNR 值与 T_1-T_5 中的最大值的比值, 虚曲线和虚短竖线则表示 JP 发射站 2009 年相应的结果; 图 7b 和图 7c 分别代表玉树地震和汶川地震的 RA 发射站的计算结果; 图 7d 给出了玉树地震前 2010 年与 2009 年 T_1-T_5 JP 发射站信号 SNR 的差值曲线; 图 7e 和图 7f 分别为玉树地震和汶川地震 RA 发射站信号 SNR 的差值曲线。

由图 7a 可以看出玉树地震前 T_1-T_4 , JP 发射站 2010 年与 2009 年 SNR 的时间演化趋势有很好的一致性。 T_4-T_5 2010 年和 2009 年的 SNR 变化趋势相反, 2010 年 SNR 减弱, 2009 年 SNR 增强。图 7d 也说明了这一点, T_1-T_4 2010 年与 2009 年 SNR 差值曲线变化较小, 斜率 k 绝对值小于 0.5, 而 T_4-T_5 差值曲线斜率较大, $k=-0.8$, 说明在这个过程中震前 SNR 相对没有地震发生的 2009 年背景值有较大的差异。玉树地震前 RA 发射站信号 SNR 与 JP 发射站的有着非常相似的时间演化趋势(图 7b, e)。

由图 7c 和图 7f 可以看出, T_4-T_5 , 2008 年汶川地震前 SNR 减弱, 2008 年与 2007 年背景差值曲线斜率较大, $k=-0.8$, 说明震前相对背景 SNR 发生了较大扰动。需要说明的是, T_1-T_2 汶川 $M_s8.0$ 地震的差值曲线斜率也比较大, $k=-0.8$, 即震前 SNR 在这个过程相对背景也出现了较大变化, 但由于该时段距地震发生时间较远(超过 48 天), 因此这期间的 SNR 扰动由地震引起的可能性不大。汶川 $M_s8.0$ 地震前 SNR 的变化曾被前人研究过(何宇飞等, 2009), 他们发现震前约 40 天平均 SNR 下降。本文在对孕震期 SNR 变化的研

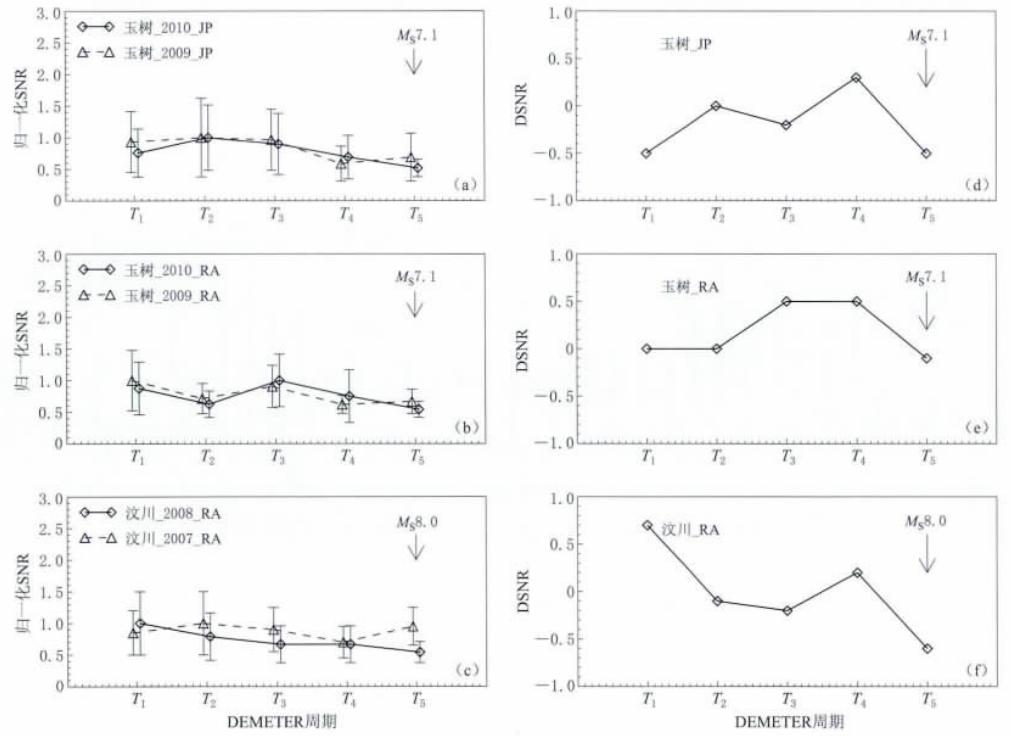


图 7 相应地震震前 DEMETER 卫星 5 个重访周期的平均信噪比

(a)–(c) 归一化 SNR 的时序变化及其误差分布; (d)–(f) 同一个频率信号 SNR 不同年份间的差值

Fig. 7 Averaged SNR during the DEMETER satellite five revisited periods just before the corresponding earthquake

(a)–(c) The time series changing and error distributions of normalized SNR;
 (d)–(f) Difference between different years of the SNR for the same signal

究中采用了更短的时段划分方法。结果发现, 汶川震前 SNR 减弱发生在震前卫星 1 个重访周期内。

综合以上分析, 玉树地震前卫星 1 个重访周期内的 SNR 减弱现象, 很可能是由地震-电离层耦合引起的。解释这种大地震前电离层扰动的一种观点认为, 长时间尺度的电离层扰动不可能是由地震波直接引起的, 而是地震孕震带释放的水汽诱发上升大气重力波(AGW), AGW 波渗透入电离层, 引起背景电离层扰动(Molchanov, 2004; Molchanov *et al.*, 2006)。

5 结论

在磁静条件下, DEMETER 卫星 VLF 电场频谱的 SNR 研究结果表明, 3 个不同频率的 VLF 信号的 SNR 在玉树地震前均出现相同的变化特征, 即震前 DEMETER 卫星 1 个重访周期内的平均 SNR 明显减弱, 排除地磁活动或电离层背景变化等因素, 该震前 SNR 衰减现象很可能由地震孕育期地震-电离层耦合所致。孕震期电离层 SNR 异常的时间、空间尺度以及异常幅度, 均可能与震级、震源位置以及震源机制等因素有关, 这需要通过大量的典型震例研究, 才能明确这些参量间的内在联系, 这也是我们下一步工作的方向之一。

感谢 DEMETER 卫星数据中心提供 VLF 电场频谱数据。

参 考 文 献

- 何宇飞, 杨冬梅, 陈化然, 钱家栋, 朱荣, Parrot M. 2009. DEMETER 卫星探测到可能与汶川地震有关的地面 VLF 发射站信号的信噪比变化[J]. 中国科学:D 辑, 39(4): 403—412.
- Erthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Malingre M, Menville M, Lagoutte D, Brochot J Y, Colin F, Elie F, Legendre C, Zamora P, Benoist D, Chapuis Y, Artru J, Pfaff R. 2006. ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planet Space Sci.*, 54(5): 456—471.
- Inan U S, Helliwell R A. 1982. DE-1 observations of VLF transmitter signals and wave-particle interaction in the magnetosphere[J]. *Geophys Res Lett.*, 9(9): 917—920.
- Molchanov O A. 2004. On the origin of low-and middle-latitude ionospheric turbulence[J]. *Phys Chem Earth*, 29(4—9): 559—567.
- Molchanov O A, Rozhnoi A, Solovieva M, Akentieva O, Berthelier J J, Parrot M, Lefevre F, Biagi P F, Castellana L, Hayakawa M. 2006. Global diagnostics of the ionospheric perturbations related to the seismic activity using the VLF radio signals collected on the EMETER satellite[J]. *Nat Hazards Earth Sys.*, 6(5): 745—753.

作者简介



姚丽 中国地震台网中
心副研究员。2005年中
国科学技术大学地球物理专
业毕业，获理学硕士学位；
2009年中国科学院空间科学与
应用研究中心空间天气专业毕
业，获博士学位。现从事地磁与空
间物理研



石云 防灾科技学院讲
师，湖南师范大学水文水
资源专业在读博士研究生。
2004年湖南科技大学地理科
学专业毕业，获理学学
士学位；2008年湖南师范大
学自然地理专业毕业，
获理学硕士学位。2010至
今主要从事地震地下流体研究。



周洪娟 哈尔滨工业大学
(威海)讲师，哈尔滨工业大
学信号与信息处理专业的在读博
士研究生。2005年天津大学通信与信
息系统专业毕业，获硕士学位。
曾从事雷达信号预处理等
方面的研究。现主要从事
舒曼谐振观测分析与地震电磁信号
处理等方面的研究。



李孝波 中国地震局工程
力学研究所在读博士研究
生。2008年中国地质大学
(北京)土木工程专业毕业，
获工学学士学位；2009年
进入中国地震局工程力学
研究所攻读岩土工程专业
硕士学位，2011年获得直
接攻读岩土工程专业博士学位资格。
主要从事岩
土工程抗震和场地地震反应方面的
研究工作。



孙小龙 中国地震局地壳
应力研究所助理研究员，
中国地质大学(北京)在读
博士研究生，2007年中国
地震局兰州地震研究所构
造地质学专业毕业，获理
学硕士学位。曾从事地震
与地下水相互关系的研究。
现从事地震地下流体动力学与地震监测预报研究
工作。



蔡寅 山东省地震局工
程师。2007年大连理工大
学软件工程专业毕业，获
工程硕士学位。曾从事地
震信息化软件开发研究工
作。现从事强震动数据分
析、地震烈度速报及强震
预警研究工作。地球物理
学会会员。

注：池顺良、孟令媛的简介分别见本刊：Vol. 14, No. 1; Vol. 33, No. 5.