

周洪娟, 于海雁, 曹丙霞, 乔晓林. 2013. 日本 $M_w9.0$ 地震前的舒曼谐振异常分析. 地震学报, 35(3): 400–409.
Zhou Hongjuan, Yu Haiyan, Cao Bingxia, Qiao Xiaolin. 2013. Schumann resonance anomaly before the $M_w9.0$ Japan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 400–409.

日本 $M_w9.0$ 地震前的舒曼谐振异常分析^{*}

周洪娟^{*} 于海雁 曹丙霞 乔晓林

(中国山东威海 264209 哈尔滨工业大学(威海)信息工程学院)

摘要 2011 年 3 月 11 日日本本州岛东海岸附近海域发生了 $M_w9.0$ 地震. 基于中国云南的舒曼谐振(SR)观测站的磁场观测数据, 分析了与该次地震有关的 SR 疑似异常现象. 分析表明, 震前 3—4 天低阶谐振开始出现比较明显的幅度增强现象, 以 2011 年 3 月 8 日(北京时间)这一天的现象最明显, 南北向在 7:00—10:00 和 12:00—15:00 异常比较明显, 而东西向只在 12:00—15:00 异常相对比较强. 根据对 2011 年 3 月 1—11 日及对应每天前后各 15 天共 41 天的数据的联合分析, 3 月 8 日部分时间段的低阶谐振磁场差明显高于一倍甚至两倍标准差; 相比而言, 正常的一天内各阶磁场差要明显低于一倍标准差. 最后, 根据一些日本地震学者提出的 SR 异常机理, 进一步分析了在云南观测站能观测到日本地震异常的可能性. 结果表明, 在永胜观测站可以观测到日本地震引起的一阶到三阶 SR 异常, 与发现的异常主要集中在低阶的现象比较吻合.

关键词 舒曼谐振 谐振幅度 前兆异常 闪电源

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.011 中图分类号: P318.5; P352 文献标志码: A

Schumann resonance anomaly before the $M_w9.0$ Japan earthquake

Zhou Hongjuan^{*} Yu Haiyan Cao Bingxia Qiao Xiaolin

(School of Information Engineering, Harbin Institute of Technology
at Weihai, Weihai, Shandong Province 264209, China)

Abstract: Schumann resonance (SR) anomalies related to the 11 March 2011 giant earthquake near the east coast of Honshu, Japan, were analyzed based on the data from 3 observatories in Yunnan province, China. The result reveals that the resonance amplitude was enhanced 3—4 days before the earthquake, and the most obvious anomalies occurred on March 8, when the anomalies mainly appeared during 7:00—10:00 (Beijing time) and 12:00—15:00 in NS component, and 12:00—15:00 in EW component. Based on a joint analysis of 41 days' (March 1—11 plus 15 days before and 15 days after each day) data, the amplitude increase on March 8 is 1 or 2 times higher than the standard deviation, while the variation on a normal day is far below the standard deviation. In the end, it is proved that anomalies caused by earthquakes in Japan could be

^{*} 基金项目 山东省自然科学基金(ZR2010DM013)、国家自然科学基金(61201016)、科技部中日合作项目(2012DFG20510)资助.

收稿日期 2012-03-21 收到初稿, 2012-10-31 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: hongjue_zhou@sina.com

observed in Yunnan according to the anomaly mechanism proposed by some Japanese scholars, and the anomalies are mainly first- to third-mode SR anomalies, which are consistent with the observed phenomenon that anomalies mainly occurred in low modes.

Key words: Schumann resonance; resonance amplitude; precursory anomaly; lightning source

引言

舒曼谐振(Schumann resonance, 简称为 SR)电磁波是由雷电等自然放电现象激发的在地球和电离层之间传播的一种频率比较稳定的电磁波, 1952 年由舒曼发现并由此命名(Schumann, 1952). 各阶舒曼谐振波的谐振频率近似为 7.8, 13.9, 20 和 26 Hz 等. 舒曼谐振波的参数与雷暴活动的强度以及环境参数有关, 因此, 理论上讲只要能引起大气以及电离层电环境发生变化的现象都能引起 SR 参数的变化, 如太阳耀斑等剧烈活动(Roldugin *et al*, 2001; De *et al*, 2010).

近年来的研究发现, 在一些震级比较高的地震前夕, 常常伴有舒曼谐振波的幅度或频率发生异常的现象. 日本的部分学者在这方面的研究比较多. 例如, Ohta 等(2006)对台湾地区 1999—2004 年的 5 级以上地震与观测数据中舒曼谐振异常的关系进行了统计分析, 结果表明, 陆地型地震与舒曼谐振异常的相关性非常强, 海洋型地震只有在震级较高或者震源较浅时才可能引发舒曼谐振异常. 1999 年发生于台湾地区的集集 $M7.6$ 地震和嘉义 $M6.0$ 地震震前均出现四阶谐振幅度增强, 且谱峰频率发生偏移的现象(Hayakawa *et al*, 2005). 2004 年发生于日本新潟的 $M6.8$ 地震和 2007 年能登半岛的 $M6.9$ 地震均在震前 3—4 天发现第三阶谐振幅度异常增强的现象, 同时在偏离谐振频率处发现另外一种极化的谐振(Ohta *et al*, 2009; Hayakawa *et al*, 2010). 2006 年发生于台湾地区的 $M7.8$ 地震震前 3 天出现三阶和四阶幅度增强的现象(Hayakawa *et al*, 2008). 总之, SR 谐振异常与震级较大的地震之间应该存在着一定联系. 目前国内外对地震引起的舒曼谐振异常的机理的研究比较少. Hayakawa 等(2005)和 Nickolaenko 等(2006)对发生于台湾地区的集集地震引起的舒曼谐振异常的产生机理进行了推理. 他们认为在震前几天到 1 周时间内, 电离层底端将会发生扰动, 这些扰动区域相当于一个大的散射体或反射体, 使得从地球雷电中心激励产生的舒曼谐振信号传输到震区上空时发生散射, 与观测站接收到的直射舒曼谐振信号干涉叠加, 当直射波与散射波的波程差等于 $1/4$ 波长的整数倍时, 观测站处观测到的对应波长的信号将会增强.

2011 年 3 月 11 日日本本州岛东海岸附近海域发生了 $M_w 9.0$ 地震, 地震引发的海啸对人类又一次造成了重大损失. 本文主要采用位于中国云南的 SR 观测站的观测数据, 分析与该次地震有关的 SR 疑似异常现象, 并与已见报道的震例进行对比, 以期进一步挖掘潜在的异常机理.

1 SR 观测

为了进行 SR 的观测研究, 我们分别在云南的永胜、通海和巧家建立了专门的 SR 观测站, 2010 年 8 月开始正常运行. 磁场测量仪器采用高灵敏度的三轴感应式磁力计, 包括高

灵敏度磁传感器,低通高倍放大器以及数据采集、存储和传输设备,主要测量带宽在 5—36 Hz,在观测频段内的系统噪声低于 $1 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$,可用于前五阶 SR 的观测,采样率为 100 Hz. 由于 SR 磁场以水平分量为主,以下主要分析南北和东西向两个水平磁场分量. 图 1 为典型的 SR 观测频谱,为南北向某 10 min 的频谱. 其中细实线表示直接快速傅里叶变换(fast Fourier transform, 简称为 FFT)后的频谱,粗实线表示拟合后的频谱,频率分辨率为 0.1 Hz. 可见前五阶中心频率分别在 8, 14, 20, 26 和 33 Hz 左右变化,其中由于测量条件的限制,第五阶谐振只有在激励闪电电源比较强的季节和时间段才能测到.

目前,通海和巧家两个观测站的信噪比低,存在强干扰或频率渐变的宽频干扰. 图 2 为通海某天相邻 30 min 的两段观测数据的频谱,可明显看到 22 Hz 左右的频带相对宽的强干扰,并且中心频率渐变,三阶谐振完全淹没在强干扰中,这给数据处理带来困难. 巧家的情况也是如此. 因此,本文分析主要基于观测条件比较好的永胜观测站.

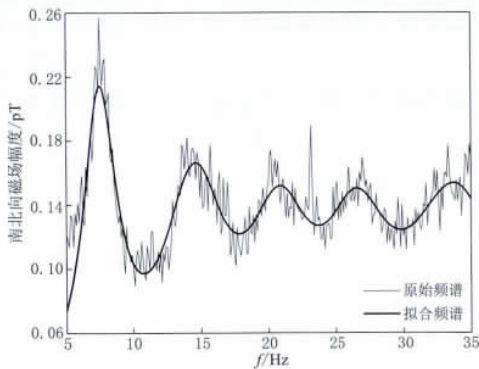


图 1 正常的 SR 频谱图

Fig. 1 Normal SR spectrum

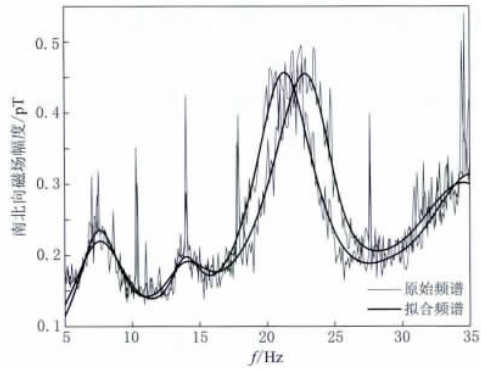


图 2 通海观测站观测到的 SR 频谱图

Fig. 2 SR spectrum of the NS component of magnetic field measured at Tonghai observatory

利用刚满一年的观测数据,得到了 SR 各阶功率谱密度(单位: $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$)在每一个月的平均、最大和最小取值分布,如图 3 所示. 图 3a, b 中的 4 个子图分别表示一阶到四阶(SR1—SR4)谐振. 可见一般情况下,南北向取值要略高于东西向,且季节变化显著. 由于夏季北半球雷暴活动频发,因此强度在一年中最强;而冬季雷暴活动最少,因此幅度最弱. 这一季节变化规律与已见报道的位于北半球的一些观测站的多年观测规律相似. 例如,位于以色列的 SR 观测站(30.35°N , 35.45°E)(Price, Melnikov, 2004)和位于俄罗斯的 Lehta 观测站(65°N , 34°E)(Yatsevich *et al.*, 2008).

2 SR 异常现象

SR 震前异常一般出现在震前两周以内,比较常见的是一周以内. 日本 $M_w 9.0$ 大地震发生于 2011 年 3 月 11 日,我们对永胜观测站震前 10 多天的数据(3 月 1—11 日)进行分析. 为了更好地提取异常信息,需要将南北和东西向磁场的背景信息去掉. 这里,每一天的背景功率谱密度用该天及其前后各 15 天共 31 天的均值来表示. 减去背景信息后南北和东西向功率谱密度差的时频图如图 4 所示. 图中显示的时间间隔为 10 min;灰度值表示磁场功率谱密度,0 表示取值小于等于背景值,大于 0 的表示取值大于背景值. 从图 4 中可

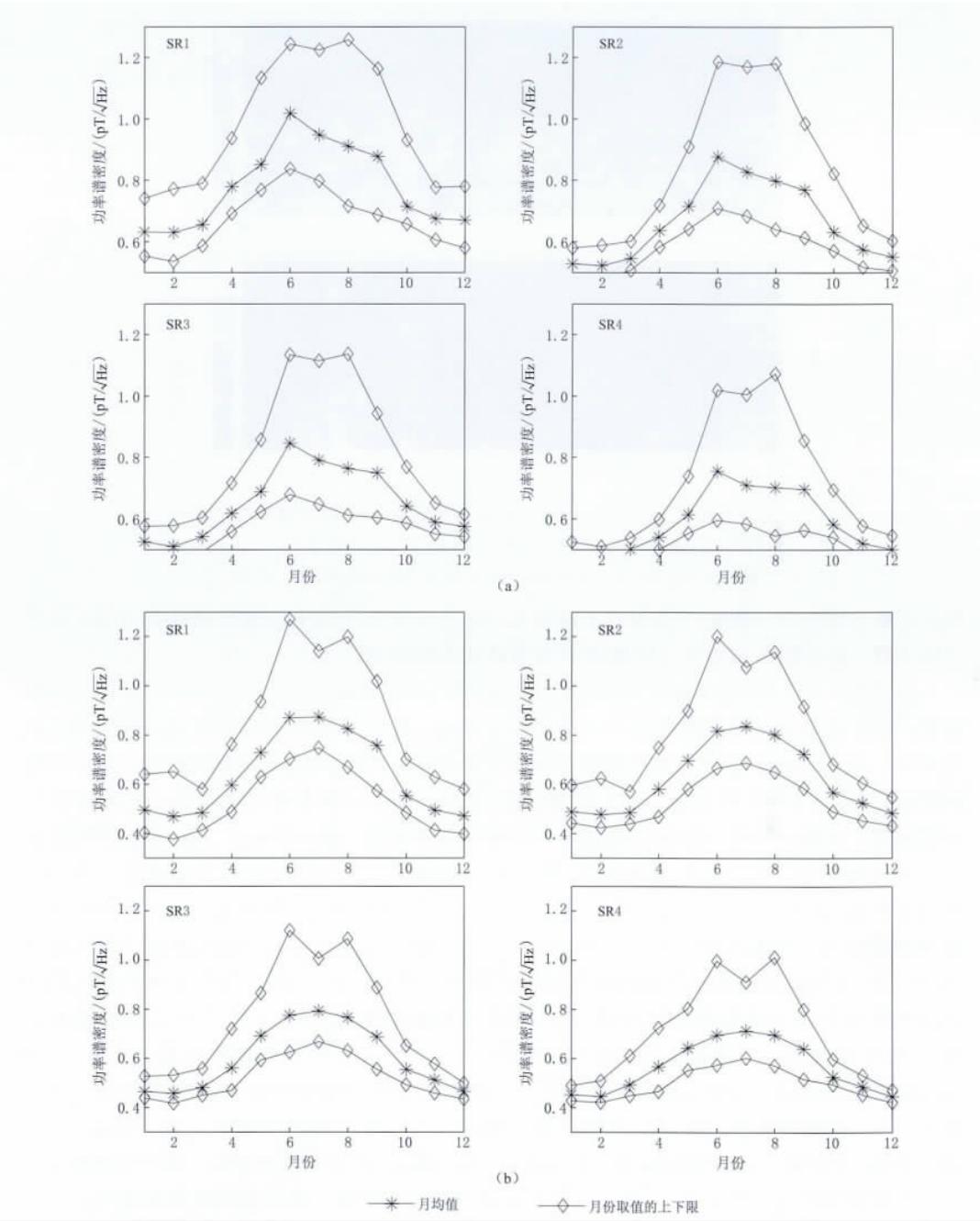


图3 南北向(a)和东西向(b)磁场一阶到四阶谐振功率谱密度在1年内(2011)的均值及变化范围

Fig. 3 Yearly variation (2011) of resonance power spectral density of NS (a) and EW (b) components

以看出,低阶谐振异常强的区域包括2011年3月2日东西向、3月3日南北向(从12:00左右持续增强至3月4日4:00左右)及3月8—9日南北和东西两向.另外,3月10—11日8:00左右也有低阶谐振持续增强的现象.同时,这一时间段出现了10和30 Hz的强干

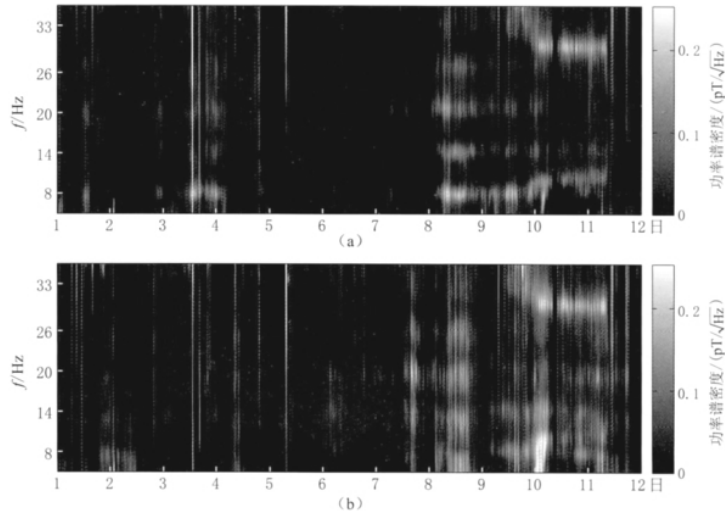


图4 2011年3月1—11日永胜南北向(a)和东西向(b)功率谱密度差时频图

Fig. 4 Time-frequency display of NS-component (a) and EW-component (b) power spectral density difference from March 1 to 11, 2011

扰,这种干扰应该与观测站周围的干扰有关,因为从建站开始永胜观测站就会不时地出现这种干扰,而在距离很近的通海和巧家观测站从未观测到。

震前第3天,即2011年3月8日的异常持续时间长,并且两个方向上均有不同程度的增强,这种现象在日常观测中迄今为止没有出现过,我们对这一天的谐振进一步分析。结果显示,南北向比东西向的异常提前出现,且南北向在7:00—10:00和12:00—15:00(北京时间,下同)异常比较明显,而东西向只在12:00—15:00异常相对比较强。在分析的31天时间内,求取每天对应这两个时间段的平均功率谱密度,进一步得到了这两个时间段31天的平均功率谱密度以及平均标准差。将3月8日两个时间段的平均功率谱密度及平均差值与之对比,如图5、图6所示。图5和图6中每个子图从左到右分别表示对南北向磁场 B_{NS} 、东西向磁场 B_{EW} 和总的合成磁场 B 的分析。图5a, b, c表示当天某个时间段的功率谱密度与前后共31天该时间段的平均功率谱密度的对比;图6a, b, c表示当天某个时间段的功率谱密度与平均功率谱密度的差值与31天的标准差的对比,设31天的平均标准差为 σ 。图5c和图6c中引入任意正常的一天(选择2011年2月28日)的功率谱密度是为了与3月8日的异常进行对比。可见,南北和东西向以及最终的合成磁场在3月8日明显增强,与图3数据对比,强度接近甚至超过3月份的最大值,一到三阶谐振磁场差明显高于 σ 甚至 2σ 。相比而言,正常的一天内各阶磁场差要明显低于 σ ,因此,异常主要出现在一到三阶谐振上。

需要说明的是,类似2011年3月8日这几天的异常现象,在不存在地震的情况下也会偶尔出现,但两个磁场分量的幅度均出现长时间的异常增强,且增强部分超过或接近 2σ 的情况很少见,或者是出现的时间主要在雷暴源爆发期间,如图7所示。异常主要发生在16:00左右,这期间是东南亚雷暴源的活跃期,强度异常增强的现象是很有可能发生的,因为每天的爆发强度肯定是有差别的。因此,3月8日的SR异常增强与地震的关联性比较大,另外,对于发生在3月2日和3月3日的短时间异常只出现在一个方向上,有可能与SR的日常变化有关。

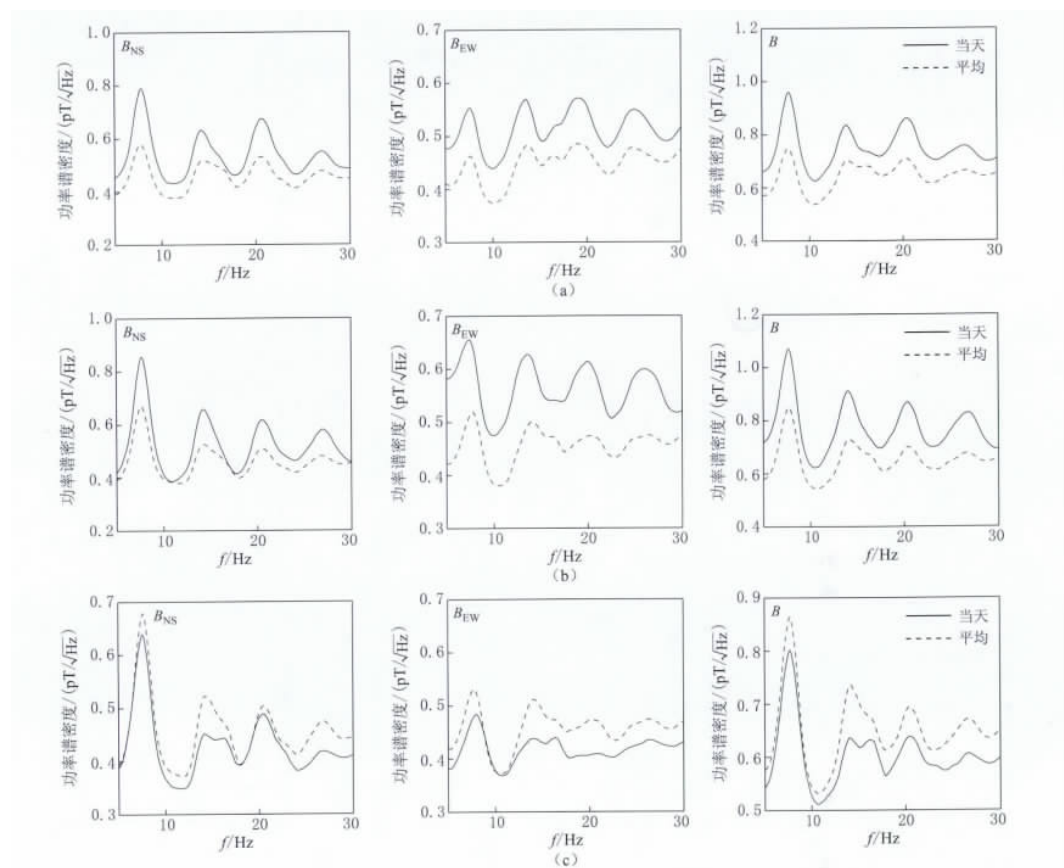


图5 异常的(2011年3月8日)和正常的(2011年2月28日)功率谱密度
与31天的平均功率谱密度的对比

(a) 3月8日7:00—10:00; (b) 3月8日12:00—15:00; (c) 2月28日12:00—15:00

Fig. 5 Abnormal (March 8, 2011) and normal (February 28, 2011) power spectral density compared with 31 days' averaged power spectral density

(a) 7:00—10:00 on March 8; (b) 12:00—15:00 on March 8; (c) 12:00—15:00 on February 28

3 SR 异常机理分析

在所分析的时间段内, 地磁指数都很低, 尤其是 2011 年 3 月 8 日这一天, 通海的地磁 k 指数都在 3 以下, 表明这期间地磁活动比较平静. 与异常最有可能相关的有两次地震, 分别是 2011 年 3 月 10 日发生于云南盈江的 $M_s 5.8$ 地震和 3 月 11 日发生于日本本州东海岸附近海域的 $M_w 9.0$ 地震.

SR 电磁波参数取决于闪电源的分布和传播路径上的大气以及电离层的状态. 按照 Hayakawa 等(2005)和 Nickolaenko 等(2006)关于几次大地震引起的 SR 异常分析, SR 谐振异常增强主要是由于地震前在震源上空电离层状态的改变, 主要体现在震源上空电离增强, 电离层高度下降, 而观测站处接收到的 SR 信号是由闪电源到观测站的直达波和闪电源经由震源上空散射至观测站的散射波叠加而成的, 当直达波和散射波传播的距离满足

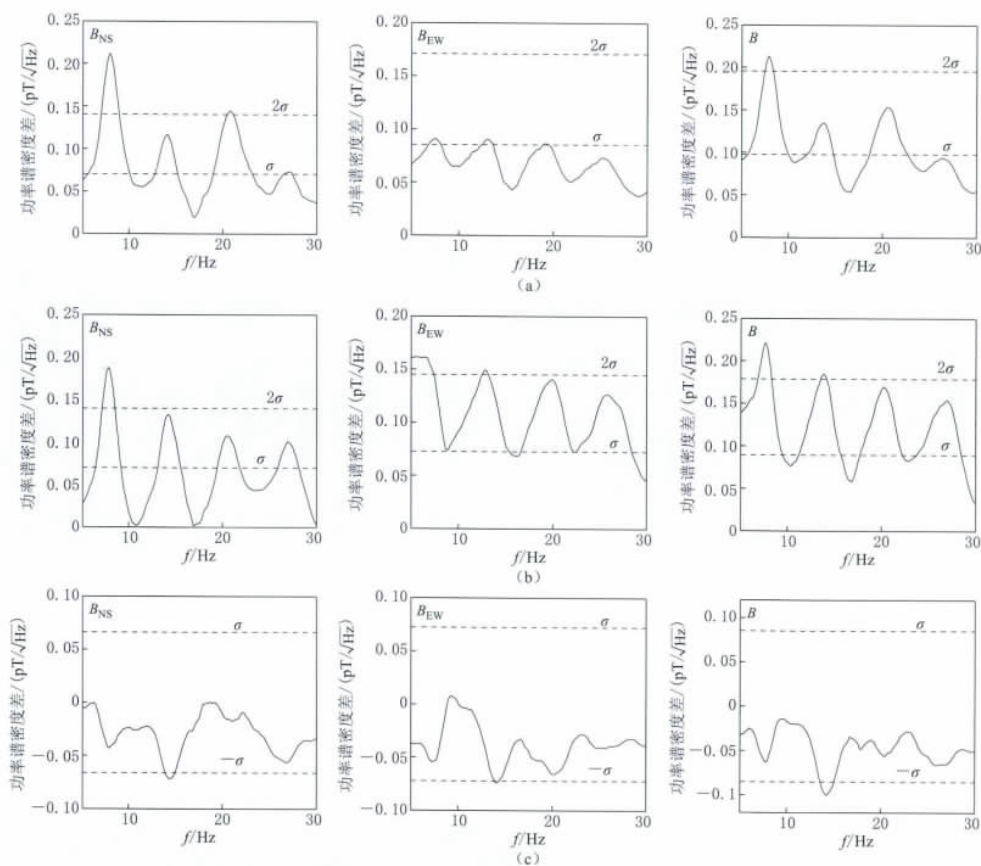


图 6 异常的(2011 年 3 月 8 日)和正常的(2011 年 2 月 28 日)功率谱密度差与 31 天功率谱密度的标准差的对比

(a) 3 月 8 日 7:00—10:00; (b) 3 月 8 日 12:00—15:00; (c) 2 月 28 日 12:00—15:00

Fig. 6 Abnormal (March 8, 2011) and normal (February 28, 2011) power spectral density difference compared with standard deviation of 31 days' power spectral density

(a) 7:00—10:00 on March 8; (b) 12:00—15:00 on March 8; (c) 12:00—15:00 on February 28

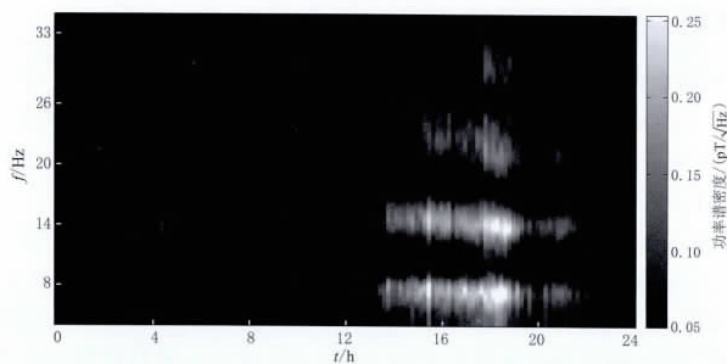


图 7 正常一天的由雷暴源而非地震引起的异常现象

Fig. 7 Anomalous phenomena caused by lightning storms instead of earthquakes on a normal day

1/4 谐振波长的整数倍时, 观测站处的 SR 就会在对应阶次上增强. Hayakawa 等(2005, 2008)分析表明, 在日本观测站只能观测到发生在台湾地区的地震引起的高阶谐振异常. 我们按照这一观点来解释永胜观测站处的异常谐振.

由美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 LIS 卫星图像表明, 在 2011 年 2—3 月期间, 闪电主要分布在喜马拉雅南麓、东南亚赤道地区、非洲中部赤道地区和南美洲热带雨林地区. 距离观测站越近, 闪电源引起的谐振幅度越强, 因此, 这一期间对永胜观测站影响最大的闪电源应该主要位于喜马拉雅南麓及东南亚赤道地区.

图 8 为永胜观测站在喜马拉雅南麓的闪电源作用下, 能观测到的各阶谐振异常所对应

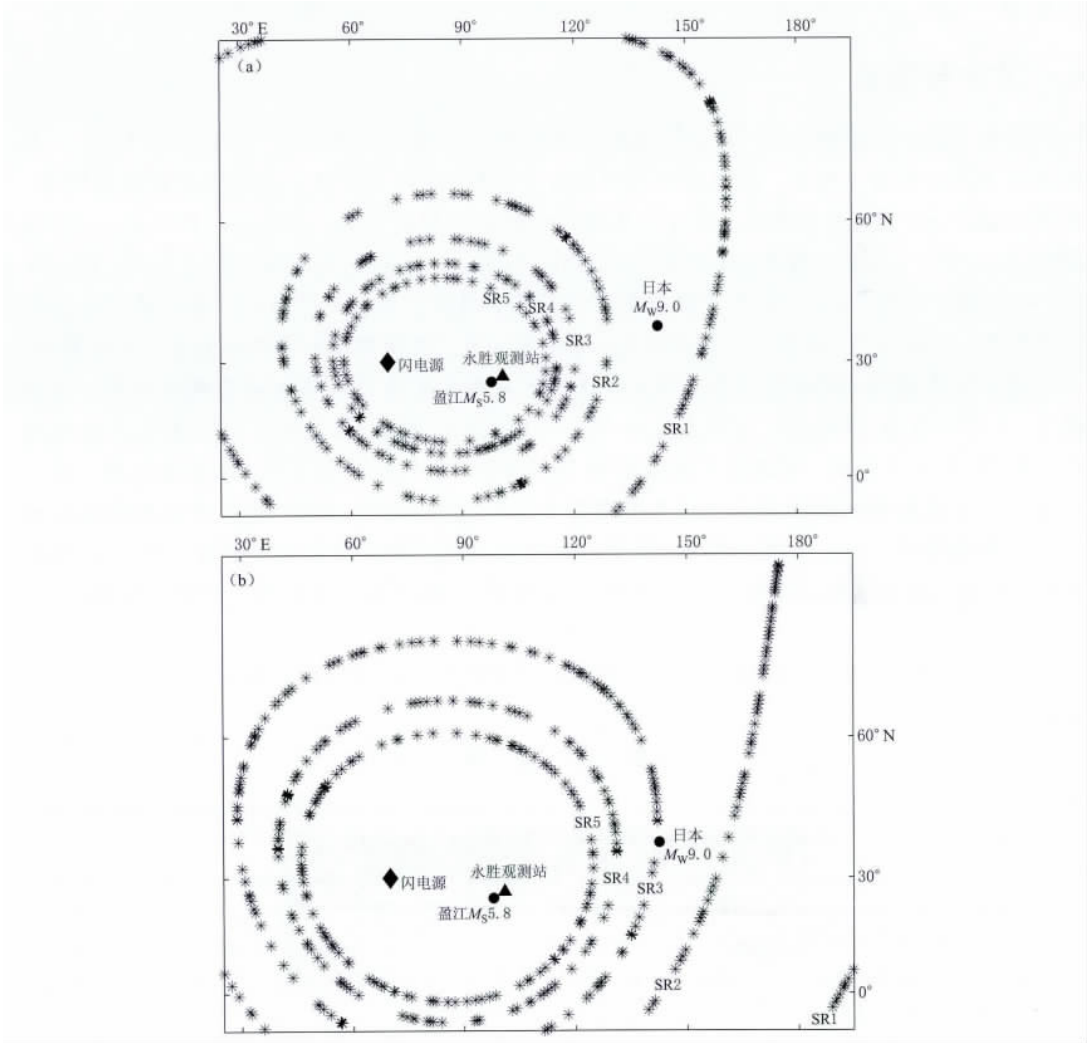


图 8 永胜观测站观测到的前五阶谐振异常所对应的震源位置简图

(a) 散射与直达波波程差为 1/4 谐振波长; (b) 散射与直达波波程差为 1/2 谐振波长

Fig. 8 Focus positions of the earthquakes possibly causing first- to fifth-mode resonance anomalies observed by Yongsheng observatory

(a) The path difference between direct and scattering waves is equal to 1/4 wavelength;
(b) The path difference between direct and scattering waves is equal to 1/2 wavelength

的震源位置简图. 图 8 中星号线表示一阶到五阶(SR1—SR5)谐振异常. 图 8a 中日本震源位于一阶与二阶谐振异常之间, 图 8b 中日本震源靠近三阶谐振异常曲线. 图 8a, b 中, 云南盈江震源位置均远离一到五阶异常分布曲线. 当闪电源位于东南亚陆地区域时, 得到的结论基本相同, 表明: ① 在永胜观测站, 能观测到日本的低阶异常的可能性比较大, 一般异常在一阶到三阶异常比较明显; ② 在永胜观测站观测到云南盈江的五阶及以下阶次的 SR 异常的可能性比较小. 因此, 观测到的 3 月 8—9 日南北和东西两向 SR 幅度异常增强的现象应该与日本大地震有关. 进一步从波的传播角度分析, 东西向幅度异常应该主要发生在东南亚闪电源活动期间, 而南北向幅度异常则应该主要发生在喜马拉雅南麓闪电源活动期间.

4 讨论与结论

分析了位于云南永胜的 SR 观测站的磁场数据, 发现了与日本 2011 年 3 月 $M_w 9.0$ 大地震有关的疑似异常现象, 并对这种现象进行了分析. 3 月 8 日这一天的异常现象最明显, 表现在低阶 SR 幅度异常增强. 南北向比东西向的异常提前出现, 且南北向在 7:00—10:00 和 12:00—15:00 异常比较明显, 而东西向只在 12:00—15:00 异常相对比较强; 通过对 3 月 1—11 日及对应每天前后各 15 天数据的联合分析, 得到了 3 月 8 日当天的低阶谐振磁场差明显高于一倍甚至两倍标准差. 相比而言, 正常的一天内各阶磁场差要明显低于一倍标准差.

异常发生期间的地磁指数都很低, 与这种异常现象最有可能相关的有两次地震, 分别是 2011 年 3 月 10 日发生于云南盈江的 $M_s 5.8$ 地震和 3 月 11 日发生于日本本州东海岸附近海域的 $M_w 9.0$ 地震. 根据日本地震学者 Hayakawa 等(2005)提出的 SR 异常机理, 进一步分析了在永胜观测站能观测到日本地震异常的可能性. 结果表明, 在永胜观测站可以观测到日本地震引起的一阶到三阶 SR 异常, 而观测到盈江地震引起的低阶异常的可能性比较低. 因此, 初步判断发现的异常现象与 2011 年日本 $M_w 9.0$ 大地震有一定的关联性.

作者对云南省地震局台网中心永胜观测站的协助观测和中国地震局的大力支持一并表示感谢.

参 考 文 献

- De S S, De B K, Bandyopadhyay B. 2010. Studies on the shift in the frequency of the first Schumann resonance mode during a solar proton event[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, **72**(11–12): 829–836.
- Hayakawa M, Ohta K, Nickolaenko A P, Ando Y. 2005. Anomalous effect in Schumann resonance phenomena observed in Japan, possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan[J]. *Annales Geophysicae*, **23**(4): 1335–1346.
- Hayakawa M, Nickolaenko A P, Sekiguchi M. 2008. Anomalous ELF phenomena in the Schumann resonance band as observed at Morshiri (Japan) in possible association with an earthquake in Taiwan[J]. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **8**(6): 1309–1316.
- Hayakawa M, Ohta K, Sorokin V M, Yaschenko A K. 2010. Interpretation in terms of gyrotropic waves of Schumann-resonance-like emissions observed at Nakatsugawa in possible association with nearby Japanese earthquakes[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, **72**(17): 1292–1298.
- Nickolaenko A P, Hayakawa M, Sekiguchi M, Ando Y, Ohta K. 2006. Model modifications in Schumann resonance intensity caused by a localized ionosphere disturbance over the earthquake epicenter[J]. *Annales Geophysicae*, **24**(2): 567–575.
- Ohta K, Watanabe N, Hayakawa M. 2006. Survey of anomalous Schumann resonance phenomena observed in Japan, in possible association with earthquakes in Taiwan[J]. *Phys Chem Earth*, **31**(4–9): 397–402.

- Ohta K, Izutsu J, Hayakawa M. 2009. Anomalous excitation of Schumann resonances and additional anomalous resonances before the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake and the 2007 Noto Hantou earthquake[J]. *Phys Chem Earth*, **34**(6-7): 441-448.
- Price C, Melnikov A. 2004. Diurnal, seasonal and inter-annual variations in the Schumann resonance parameters[J]. *J Atmos Sol-Terr Phys*, **66**(13-14): 1179-1185.
- Roldugin V C, Maltsev Y P, Petrova G A, Vasiljev A N. 2001. Decrease of first Schumann resonance frequency during solar proton events[J]. *J Geophys Res*, **106**(A9): 18555-18562.
- Schumann W O. 1952. On the free oscillations of a conducting sphere which is surrounded by an air layer and an ionosphere shell[J]. *Z Naturforschung*, (7a): 149-154.
- Yatsevich E I, Nickolaenko A P, Pechonaya O B. 2008. Diurnal and seasonal variations in the intensities and peak frequencies of the first three Schumann-resonance modes [J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, **51** (7): 528-538.

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究工作。



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.