

2010年元谋 M_s 5.2 地震前地磁极化异常研究^{*}

姚休义¹, 滕云田²

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 利用改进的地磁极化方法分析了2010年2月25日云南元谋 M_s 5.2 地震前后楚雄、永胜、通海3个台站的地磁极化值变异系数 C_{ZH} 的变化特征。结果显示: 震前3个月, 楚雄台地磁极化值出现了显著的剧烈波动, 变异系数 C_{ZH} 急剧增大, 于震前两个月达到最大, 约为正常变化值的2~3倍, 震前一个月恢复正常, 且该变化主要由垂直分量 Z 的剧烈波动引起。由于震级较小, 在震中距较远的通海和永胜台不存在类似的变化。

关键词: ULF; 地磁极化值; 震磁异常; 变异系数

中图分类号: P318

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2017)03-0444-05

0 引言

大量观测研究表明地震孕育和发生过程中伴随着地磁场的变化, 国内外很多震例研究都证实了震磁异常的存在 (Nagao *et al*, 2002; Uyeda *et al*, 2002; Hattori, 2004; Hattori *et al*, 2004b; 李琪等, 2005)。Pride (1994) 认为岩石空隙中流体是产生震前电磁异常的重要因素。微裂隙扩展时, 间隙的流体会按照达西定律扩散浸入新生及扩展裂隙, 导致震源区岩石的电导率发生改变, 进而导致外源变化磁场在地球内部感应引起的感应磁场发生变化 (Merzer, Klemperer, 1997; Hunt, 2005; Ren *et al*, 2015)。

地磁相对观测资料记录到的地磁场变化主要源自于3个部分, 第一部分为以 S_q 、磁暴、湾扰、钩扰、脉动等为主的空变化磁场; 第二部分为外部空间电流体系在导电的地球内部产生的感应磁场, 它既与外源场有关, 也携带了区域或局部台站附近地下电性结构的信息; 第三部分为可能存在的环境或人为因素引起的变化。尽管震源区从孕震到发震的过程中能量在不断积累, 感应场的变化会逐渐加强, 但它的强度仍然非常微弱, 通常被源自于空间电流体系的变化和人为干扰所覆盖 (Jeremy *et al*, 2009; Masci, 2011)。因此, 提取震前电磁异常信号最重要的是在保证数据不受干扰的情况下突出源于震源区的异常信号同时

抑制外源场的电磁信号。基于此, Hayakawa 等 (1996) 提出了地磁极化方法 (Polarization), 即地磁场垂直分量 (Z) 与水平分量 (H 或 G) 的频谱振幅比。该方法利用岩石圈 ULF 电磁信号的特征, 即垂直分量 Z 比水平分量 H 相对较大, 从而把岩石圈 ULF 电磁信号与源于空间电流体系的 ULF 电磁信号区别开来。地磁极化法是目前国际上取得震例较多, 震磁异常提取效果较好的方法之一 (Hayakawa *et al*, 2000; Molchanov *et al*, 2003; Prattes *et al*, 2008; 冯志生等, 2010; Li *et al*, 2011)。本文对极化法作了改进, 用于提取震级较小或震中距较远的震磁异常信号, 并使用该改进方法分析了2010年元谋 M_s 5.2 地震前后楚雄、永胜、通海台的地磁极化值变化特征。

1 观测数据

2010年2月25日4时56分, 云南楚雄彝族自治州禄丰县、元谋县交界发生 M_s 5.2 地震, 震源深度20 km, 发震构造为位于元谋断陷盆地西侧近NS向的元谋—绿汁江断裂。云南省内固定地磁观测台站及震中位置如图1所示, 各台站与元谋地震震中的震中距如表1所示。距离震中最近的台站为楚雄地磁台, 震中距仅56 km, 本文重点分析该台站记录到的震前地磁极化值变化特征, 永胜和通海台的观测数据作为对比分析。楚雄和永胜地磁台观测仪器为 GSM-19FD 型 dIdD 磁力仪, 采样率

^{*} 收稿日期: 2017-04-06.

基金项目: 中国地震局监测预报司2017年度震情跟踪定向工作任务青年课题 (2017010417) 资助.

为1 sps, 连续记录磁偏角 (D)、倾角 (I) 和总强度 (F) 的变化, 通过地磁场七要素之间相互关系计算出水平分量 (H) 和垂直分量 (Z) 及偏角 (D)。通海地磁台观测仪器为 GM4 磁通门磁力仪, 采样率为1sps, 连续记录水平分量 (H)、垂直分量 (Z) 和磁偏角 (D) 的变化。

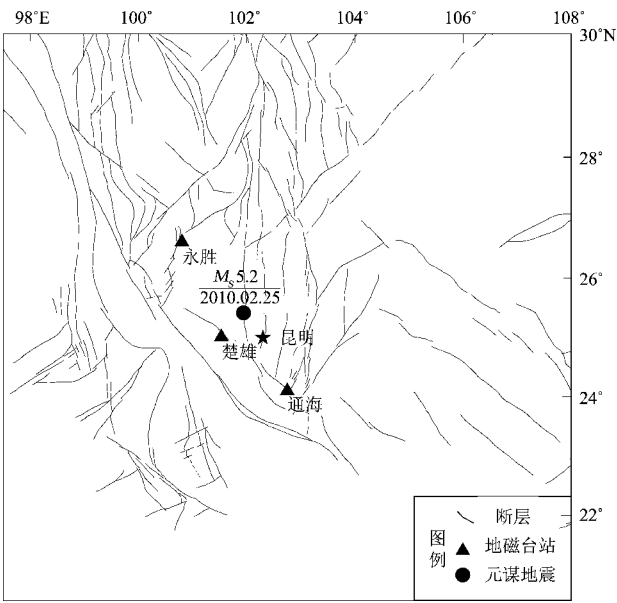


图1 云南省内固定地磁台站及元谋地震震中分布
Fig. 1 Distribution of permanent geomagnetic stations in Yunnan Province and epicenter of Yuanmou $M_s5.2$ earthquake

表1 各地磁台站与元谋地震震中的震中距
Tab. 1 List of the Yuanmou earthquake from epicentral distance of geomagnetic stations

序号	台站	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	震中距/km
1	楚雄 (CHX)	25.4	101.9	56
2	永胜 (YOS)	25.9	99.7	200
3	通海 (THJ)	23.5	98.9	310

2 极化分析方法

地磁极化法是指求出地磁垂直分量与水平分量的谱密度之比, 并分析该比值随时间的变化特征, 极化值按如下公式计算:

$$Y_{ZH} = \frac{S_{Z(\omega)}}{S_{H(\omega)}}, Y_{ZG} = \frac{S_{Z(\omega)}}{S_{G(\omega)}} \tag{1}$$

$$G = \sqrt{(H^2 + D^2)} \tag{2}$$

其中: $S_{Z(\omega)}$ 、 $S_{H(\omega)}$ 、 $S_{G(\omega)}$ 分别为垂直分量 Z 、水平分量 H 和总水平分量 G 的频谱振幅。为了避开日间可能的人为干扰, 本文选取了地方时22:00:00—01:59:59的数据进行计算。按30 min 分段进行傅立叶谱计算, 并按频率对上述8个时段内的频谱幅值求平均, 最后针对 ULF 辐射频段进行谱值积分, 即可得到 $S_{Z(\omega)}$ 、 $S_{H(\omega)}$ 和 $S_{G(\omega)}$ 。

由电磁场的趋肤效应可知, 不同周期的电磁信号在不同电性结构的震源区具有不同的穿透深度。反之, 震源区电性结构及震源深度等差异, 也会对各地震的优势 ULF 辐射频段产生影响, 优势辐射频段可用以下趋肤公式计算:

$$\delta = \left[\frac{2\rho}{\mu\omega} \right]^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

式中: δ 为震源深度; ρ 为震源区岩石的电阻率; μ 为磁化率; ω 为角频率。由于无法获取震源区精确的磁化率, 本文采用了真空中的磁化率值, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)。震中距为29 km 的元谋台电测深曲线显示, 震源深度为20 km 的电阻率约为 $30 \Omega \cdot m$ 。因此, (3) 式中震源区电导率 $\rho \approx 30 \Omega \cdot m$ 。计算结果显示, 0.02 Hz 是最可能提取到的与震源区电性结构变化有关的震磁异常频率。考虑到震源区岩石磁化率和电阻率的不确定性, 最终将分析频段拓宽至0.01 ~ 0.03 Hz。

极化方法能提取到的震前地磁异常信号范围有限, Hattori 等 (2004a) 统计发现, 只有在震级 M 和震中距 R 满足 $0.025R \leq M - 4$ 的情况下, 90% 的地震震前才会出现 ULF 异常信号。根据 Hattori 的统计结果, 5.0 级地震产生的地磁 ULF 辐射能量仅仅能影响震中距40 km 以内的台站, 而目前我国固定地磁观测台站布设较为稀疏, 尤其是对于地震频发的西部地区, 台站间距均在200 km 以上, 直接从辐射能量上提取异常难度较大。笔者认为对于震中距稍远的台站, 虽然辐射能量较微弱, 难以识别, 但可能会存在能量在某一正常阈值内剧烈波动的情况。为了描述极化值波动程度且使得各台站之间便于对比, 笔者在提取地磁极化值的基础上计算了各台站极化值的变异系数 (CV, 又称相对标准偏差 RSD)。以极化值 Y_{ZH} 为例, 其变异系数计算如下:

$$C_{ZH} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ZH_i} - \mu)^2}{n}}}{\mu}, (n = 5) \tag{4}$$

式中： C_{ZH} 为极化值 Y_{ZH} 的变异系数； μ 为每 5 天极化值的均值。

3 震例分析

为考察地震前后地磁极化值变化情况，本文

计算了楚雄、永胜、通海 3 个台站 2009 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日 0.01 ~ 0.03 Hz 频段的极化值变异系数 C_{ZH} 、 C_{ZG} 。因二者变化较为类似，本文仅以 C_{ZH} 为例，给出各台站地震前后的变异系数计算结果。此外，垂直分量 Z 的增大及水平分量 H 变小均会导致极化值 C_{ZH} 增大，而后者与地震并无关系，因此为了明确异常极化值变化的来源，将垂直分量 Z 和水平分量 H 的频谱变异系数也给出，同时还分析了该时间段内地磁活动性指数 Dst 的变化情况，如图 2 所示，图中虚线为均值加 2 倍均方差阈值线。

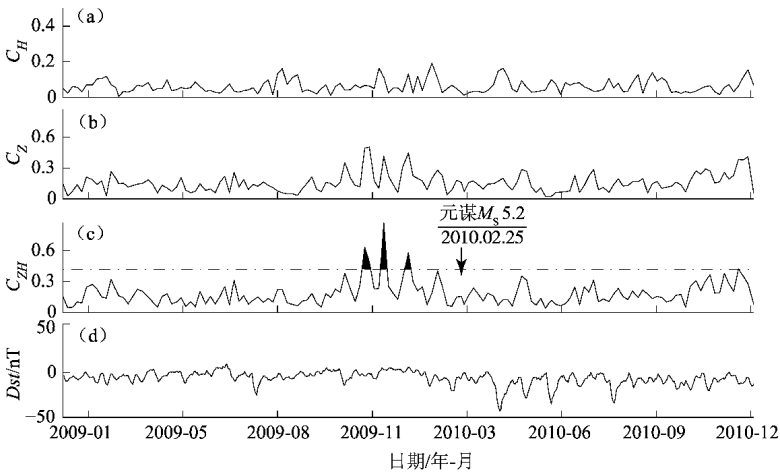


图 2 楚雄台水平分量 H 频谱变异系数 C_H (a)、垂直分量 Z 频谱变异系数 C_Z (b)、极化值变异系数 C_{ZH} (c) 和 Dst 指数 (d) 变化曲线

Fig. 2 C_H 、 C_Z 、 C_{ZH} of spectrum calculated by H (a), Z (b) components and polarization value (c) and Dst index (d) in Chuxiong station

从图 2 可以看出，震前 3 个月楚雄台极化值变异系数 C_{ZH} 显著增大，并于震前 2 个月达到最大值，为正常变化值的 2 ~ 3 倍，直到震前 1 个月恢复正常。该时间段内 Dst 指数均大于 -30，地磁场处于平静状态。对比各时间段变异系数 C_{ZH} 与 Dst 的变化情况可以看出，震前 C_{ZH} 的增强与外源场的变化没有关系。在 C_{ZH} 显著增强的时段内，同步的垂直分量变异系数 C_Z 也呈现出增强的趋势，而同步的 C_H 处于正常变化范围内，无明显减弱或增强变化，由此可排除水平分量 H 减小导致 C_{ZH} 增大的可能。该时段极化值 Y_{ZH} 出现的剧烈波动应为垂直分量 Z 异常波动导致。由于地壳的屏蔽作用，可把外源感应电流的电流源看作近地表的水平电流，与观测仪器处于同一水平面，因此，地下电性结构或局部环境的变化导致的感应场变化异常主要体现在垂直分量

Z (丁鉴海等, 1994; 李琪等, 2006)。
为了考察异常变异系数的空间分布情况，计算了通海及永胜台的地磁极化值变异系数 C_{ZH} (图 3)。通海台 2009—2010 年变异系数 C_{ZH} 变化较为平稳，不存在与楚雄台类似的异常变化特征，可能与震级太小或震中距太大有关。永胜台该时段数据缺失，无法进行对比分析，但该台站震中距较通海台更远，异常极化值出现的可能性较小。

4 结论和讨论

由于此次地震震级 M 和震中距 R 不满足 Hattori 等 (2004a) 提出的 $0.025R \leq M - 4$ 关系，如果直接从极化值的变化幅度上提取异常可能性较小，于是计算了极化值的变异系数 (CV)，用于描述极

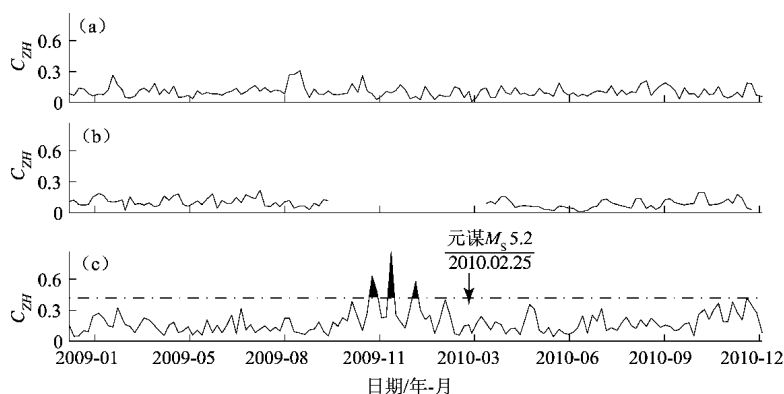


图3 通海台 (a)、永胜台 (b) 和楚雄台 (c) 变异系数 C_{ZH} 变化曲线

Fig 3 Temporal evolution of C_{ZH} in Tonghai (a), Yongsheng (b) and Chuxiong (c) stations

化值的波动程度。分析了云南楚雄、永胜、通海3个地磁台站变异系数 C_{ZH} 在2010年元谋 $M_s 5.2$ 地震前后的变化,发现楚雄台变异系数 C_{ZH} 在震前3个月出现了显著增强现象,此异常主要由垂直分量 Z 的异常波动引起,并于震前一个月恢复正常。 C_{ZH} 高值异常出现时间与 Hayakawa 等 (1996; 2000) 及其他学者 (Molchanov *et al*, 2003; Li *et al*, 2011) 的研究中异常出现的时间较为一致。由于震中距较远或震级较小原因,此异常在通海台并未出现。

研究结果表明,当震中距稍远时,可能存在极化值在某一正常阈值内剧烈波动的情况。Han 等 (2011) 在2000年日本伊豆震群前也发现了垂直分量 Z 存在波动剧烈的情况, Hattori 等 (2013) 对日本2000—2010年的震例进行了统计,结果表明震前垂直分量 Z 波动明显。Gotoh 等 (2003), Telesca 等 (2007, 2008), 荣扬名等 (2012) 曾将分形分析方法用于震磁关系研究中,结果显示,地震前地磁非均匀标度特征均呈现出分形指数减小的变化,表示观测信号增加了随机不相关高频波动成分。可能的解释为,震前震源区正处于自组织临近动态演变阶段,岩石介质呈蜂窝空隙状,其结构越来越具有脆性特征,破裂过程中产生 ULF 电磁信号的同时也会产生高频的波动。

尽管地磁极化法取得了很多成功的震例,但国内外对该方法提取震磁异常的可靠性仍存有争议 (Jeremy *et al*, 2009; Masci, 2011)。主要争议点在于,即使选取子夜时间段数据进行研究,也无法排除磁层电流体系的影响,极化值升高很有可能与外源场变化有关。Currie 和 Waters (2014) 系统分析了极化值与 K_p 指数、 AE 指数及 SYM-H

指数的相关性,证实了两者并不相关。本文也计算了 Dst 指数与 C_{ZH} 的相关程度,相关系数仅为 0.08,再次验证二者并不相关。此外,由于 C_{ZH} 的增大源于垂直分量 Z 的波动而非 H 的变化,进一步表明此异常与外源场变化无关。而此变化特征在震中距很近的观测台站是否存在以及此现象是否具有普遍性尚需要更多震例验证。

参考文献:

- 丁鉴海,卢振业,黄雪香. 1994. 地震电磁学[M]. 北京:地震出版社.
- 冯志生,李琪,卢军,等. 2010. 基于磁通门秒值数据的地震 ULF 磁场可靠信息提取研究[J]. 华南地震,30(2):1-7.
- 李琪,林云芳,曾小苹. 2006. 应用小波变换提取张北地震的震磁效应[J]. 地球物理学报,49(3):855-863.
- 李琪,杨冬梅,张素琴,等. 2005. 地磁转换函数方法之典型震例及数模对比[J]. 地震,25(3):85-90.
- 荣扬名,王桥,丁霞,等. 2012. 2011年日本东北大地震特低频地磁信号的分形标度特征研究[J]. 地球物理学报,55(11):3709-3717, doi:10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 11. 018.
- CURRIE J L, WATERS C L. 2014. On the use of geomagnetic indices and ULF waves for earthquake precursor signatures[J]. J Geophys Res, 119(2):992-1003.
- GOTOH K, HAYAKAWA M, SMIRNOVA N A. 2003. Fractal analysis of seismogenic ULF emission[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 29(4):419-424.
- HAN P, HATTORI K, HUANG Q, *et al*. 2011. Evaluation of ULF electromagnetic phenomena as associated with the 2000 Izu islands earthquake swarm by wavelet transform analysis[J]. Nat Hazards Earth SystSci, 3(11):965-970.
- HATTORI K, HAN P, YOSHINO C, *et al*. 2013. Investigation of ULF seismic-magnetic phenomena in Kanto, Japan during 2000-2010: case studies and statistical studies[J]. Surv Geophys, 34(3):293-316.
- HATTORI K, TAKAHASHI I, YOSHINO C, *et al*. 2004a. ULF geomagnet-

- ic field measurements in Japan and some recent results associated with IwatekenaitikuHokubu earthquake in 1998 [J]. *Phys Chem Earth*, 29(4-9):481-494.
- HATTORI K. 2004b. ULF geomagnetic changes associated with large earthquakes[J]. *TerrAtmosOcean Sci*, 15(3):329-360.
- HAYAKAWA M, ITOH T, HATTORI K, *et al.* 2000. ULF electromagnetic precursors for an earthquake at Biak, Indonesia on February 17, 1996 [J]. *Geophys Res Lett*, 27(10):1531-1534.
- HAYAKAWA M, KAWATE R, MOLCHANOV O A, *et al.* 1996. Results of ultra-low-frequency magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993[J]. *Geophys Res Lett*, 23(3):241-244.
- HUNT A G. 2005. Comment on “Modeling low-frequency magnetic-field precursors to the Loma Prietaearthquake with a precursory increase in fault-zone conductivity” by M. Merzer and S. L. Klemperer[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 162(12):2573-2575.
- JEREMY N T, JEFFREY J L, MALCOLM J S J, *et al.* 2009. On the reported magnetic precursor of the 1993 Guam earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, 36(16):L16301.
- LI Q, ZHU P Y, ALIMJIAN M, *et al.* 2011. Detection of ULF electromagnetic emissions as a precursor to two earthquakes in China[J]. *Earthq Sci*, 6(24):601-607.
- MASCI F. 2011. On the seismogenic increase of the ratio of the ULF geomagnetic field components[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 187(1-2):19-32.
- MERZER M, KLEMPERER S L. 1997. Modeling low-frequency magnetic-field precursors to the Loma Prietaearthquake with a precursory increase in fault-zone conductivity[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 150(2):217-248.
- MOLCHANOV O, SCHEKOTOV A, FEDOROV E, *et al.* 2003. Preseismic ULF electromagnetic effect from observation at Kamchatka[J]. *Nat Hazards Earth SystSci*, 3(314):203-209.
- NAGAO T, ENOMOTO Y, FUJINAWA Y, *et al.* 2002. Electromagnetic anomalies associated with 1995 Kobeearthquake[J]. *Journal of Geodynamics*, 33(4-5):401-411.
- PRATTES G, SCHWINGENSCHUH K, EICHELBERGER H U, *et al.* 2008. Multi-point ground-based ULF magnetic field observations in Europe during seismic active periods in 2004 and 2005[J]. *Nat Hazard Earth SystSci*, 3(8):501-507.
- PRIDE S R. 1994. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous-media[J]. *Phys Rev B*, 50(21):15678-15696.
- REN H X, WEN J, HUANG Q H, *et al.* 2015. Electrokinetic effect combined with surface-charge assumption: a possible generation mechanism of coseismic EM signals[J]. *Geophysical Journal International*, 200(2):835-848.
- TELESCA L, HATTORI K. 2007. Non-uniform scaling behavior in Ultra-low-frequency (ULF) earthquake-related geomagnetic signals[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2):522-528.
- TESECA L, LAPENNAV, MACCHIATOM, *et al.* 2008. Investigating non-uniform behavior in Ultra Low Frequency (ULF) earthquake-related geomagnetic signal[J]. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 268(1):219-224.
- UYEDA S, HAYAKAWA M, NAGAO T, *et al.* 2002. Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activities in 2000 in the Izu Island Region, Japan[J]. *Proc Natl AcadSci USA*, 99(11):7352-7355.

Variation of Geomagnetic Polarization Value Associated with the 2010 Yuanmou $M_s 5.2$ Earthquake

YAO Xiuyi¹, TENG Yuntian²

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

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

Abstract

The geomagnetic data recorded by the Chuxiong, Yongsheng and Tonghai stations in Yunnan province before and after Yuanmou $M_s 5.2$ earthquake in 2010 were analyzed with improved polarization method, and the coefficient of variation (CV) with polarization value was calculated. The results show that, there is an obvious enhancement of C_{ZH} in Chuxiong station in almost 3 months before the Yuanmou earthquake that occurred on 25 February 2010 and recovery on January 2010, and the anomaly reached 2~3 times of its normal levels, which may be caused by the vigorous fluctuation of vertical component. However, there was no similar variation existed in the other two stations.

Keywords: ULF; geomagnetic polarization; geomagnetic variation anomalies associated with earthquakes; coefficient of variation