

李琪, 袁伊人, 杨星, 蔡绍平, 孙维怀. 2016. 2013 年 3 月 3 日洱源 $M_s5.5$ 地震前地磁谐波振幅比异常研究. 地震学报, **38**(1): 122–129. doi:10.11939/jass.2016.01.012.
Li Q, Yuan Y R, Yang X, Cai S P, Sun W H. 2016. Variation of the geomagnetic harmonic wave amplitude ratio before the $M_s5.5$ Eryuan earthquake in 2013. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(1): 122–129. doi:10.11939/jass.2016.01.012.

2013 年 3 月 3 日洱源 $M_s5.5$ 地震前 地磁谐波振幅比异常研究^{*}

李 琪^{1),*} 袁伊人¹⁾ 杨 星²⁾ 蔡绍平²⁾ 孙维怀³⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国昆明 650224 云南省地震局

3) 中国通海 652700 云南省地震局通海地震台

摘要 本文首先使用滇西北地磁台阵 8 个测点 2012 年 6 月 1 日—2013 年 5 月 31 日记录的短周期地磁数据, 计算得到各测点的谐波振幅比时间序列变化曲线. 该曲线显示: 各测点的谐波振幅比 Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 在 2013 年 3 月 3 日普洱 $M_s5.5$ 地震前均呈显著高值, 发震前则刚好是由高转低再上升的一个转折点; 而谐波振幅比 Y_{ZH_x} 没有出现类似的异常变化. 其次通过对台阵区地下电导率结构的定性分析, 对该计算结果予以解释. 对于地磁短周期垂直分量反相现象和威斯矢量分布的分析结果表明, 地下存在着近似南北走向的电导率异常带. 由于台阵区域 Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 的异常变化代表南北向地下电导率变化和地下电导率不均匀, 因此谐波振幅比的变化与电导率异常带的分布一致, 表明谐波振幅比的变化与地下电性结构密切相关.

关键词 谐波振幅比 地下电导率结构 地磁台阵 震例分析

doi:10.11939/jass.2016.01.012 中图分类号: P315.72⁺1 文献标志码: A

Variation of the geomagnetic harmonic wave amplitude ratio before the $M_s5.5$ Eryuan earthquake in 2013

Li Qi^{1),*} Yuan Yiren¹⁾ Yang Xing²⁾ Cai Shaoping²⁾ Sun Weihuai³⁾

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

2) Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, China

3) Tonghai Observatory, Earthquake Administration of Yunnan Province, Yunnan Tonghai 652700, China

Abstract: Based on the 1 second sampling geomagnetic data derived from the eight stations of geomagnetic array in Yunnan Province from June 1, 2012 to May 31, 2013, the temporal variations of the geomagnetic harmonic wave amplitude ratios were analyzed. It was found that both the geomagnetic harmonic wave amplitude ratios Y_{ZH_y} and Y_{HD} were enhanced just before the $M_s5.5$ Eryuan earthquake on 3 March 2013, but no similar variation appeared for the ratio Y_{ZH_x} . In order to explain the result, both the temporal evolution of origi-

* 基金项目 地震行业科研专项(200708033)资助.

收稿日期 2015-05-18 收到初稿, 2015-08-18 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: dareyli@163.com

nal vertical components (Z) and the distribution of Weiss vectors were analyzed, and it was found that there was an NS-oriented high conductivity layer on the underground. Considering that the ratios Y_{ZH_y} , Y_{HD} and Y_{ZH_x} are related with the variation of NS-oriented conductivity, the heterogeneity of underground electrical structure and the variation of EW-oriented conductivity, respectively, it was deduced that the variation of the geomagnetic harmonic wave amplitude ratios was closely related to the underground electrical structure.

Key words: harmonic wave amplitude ratio; underground conductivity structure; geomagnetic array; case study

引言

岩石破裂实验表明, 岩石电导率与应力应变关系密切(郝锦琦等, 1989)。地震孕育过程中, 地震震源体及其附近岩体的应力应变逐渐积累, 地下岩石的电导率也随之产生变化; 尤其是有流体存在的地方, 由于岩石在应力作用下达到其破裂强度的 $1/3-1/2$ 时会产生大量微裂隙, 若含有电解质的流体填充到这些裂隙中, 电导率会产生极大变化。存在于中下地壳的地壳深部流体对地震活动起着关键作用(车用太, 鱼金子, 2014), 而地下介质电导率的变化则可以反映地下流体的活动。根据电磁感应理论, 地下介质电导率的变化会使地表处磁场的感应成分产生变化, 因此监测该变化可以为地震预测提供判据。

对于简单均匀分层介质, 地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} 和 Y_{ZH_y} 与地下介质的视电阻率成正比, 所以可通过谐波振幅比的时间变化直观地了解地下视电阻率的变化。冯志生等(2004, 2009, 2013)对不同强度地震前地磁谐波振幅比的异常变化特征进行了分析总结, 结果表明: 地震前后谐波振幅比的趋势性异常均表现为下降—转折—恢复的变化趋势; 中强地震震前谐波振幅比异常的持续时间为 1—3 年(冯志生等, 2004); $M > 7$ 地震震前异常持续时间一般在 4 年以上, 且异常幅度较大, 为 0.10—0.20 以上(冯志生等, 2013); 当震中距较大时, 地磁谐波振幅比的异常变化过程由长周期向短周期迁移, 而当震中距较小时, 异常变化过程则由短周期向长周期迁移(冯志生等, 2009)。

尽管已有很多谐波振幅比的震例研究, 但这些研究均是在对地下结构完全不了解的情况下开展的, 所以其结果无法与地下电导率结构相联系。由于天然电磁场有颇丰富的频谱成分和较宽的频带, 天然源物探方法的探测深度比人工源物探方法的大, 可以获得从地壳浅部直至地幔深部的介质导电性能的信息, 因此通过短周期地磁信号可获取地下电导率的分布。

本文拟利用滇西北地磁台阵 8 个磁通门磁力仪测点记录的短周期地磁信号资料, 计算该台阵区 2013 年洱源 $M_s 5.5$ 地震前后的谐波振幅比变化, 并定性地判定地下电导率异常的走向, 试图探索谐波振幅比变化与地下电性结构之间的关系。

1 云南地磁台阵概况

滇西北地磁台阵包括布设在云南省西北角的 8 个观测点, 各测点平均间距约为 30 km, 台阵布置如图 1 所示。各测点在遴选过程中对磁场梯度和背景噪声均进行了严格测试, 其观测场地满足 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 范围内地磁场总强度 F 分布均匀, 且水平梯度 $\Delta F_h \leq 5\text{ nT/m}$, 电磁环境满足背景噪声小于 0.1 nT 的要求, 符合地磁三级固定观测网的技术指标。

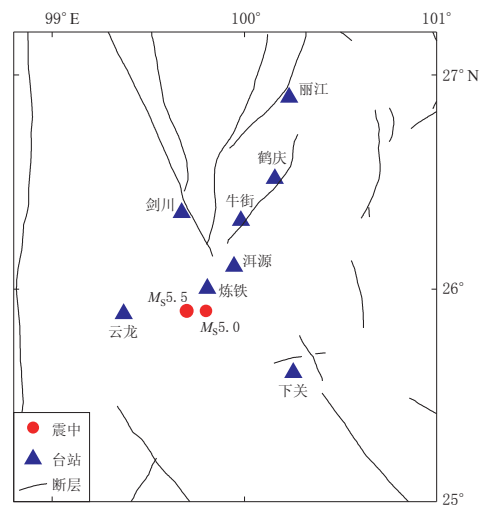


图 1 滇西北地磁台阵测点和两次洱源地震震中分布图

Fig.1 Locations of eight stations of north-western Yunnan geomagnetic array and the epicenters of two Eryuan earthquakes in 2013

位置如图 1 所示. 一次为 2013 年 3 月 3 日 13 时 41 分洱源地区(25.9°N, 99.7°E)发生的 $M_s5.5$ 地震, 震源深度约为 9 km; 另一次为 2013 年 4 月 17 日 9 时 45 分洱源地区(25.9°N, 99.8°E)发生的 $M_s5.0$ 地震, 震源深度约为 5 km. 地磁台阵各个测点与这两次洱源地震震中的距离列于表 1.

2 计算方法

2.1 威斯矢量

磁感应强度 \mathbf{F} 的感应信号 ΔZ , ΔH 和 ΔD 之间的经验关系为 $\Delta Z = A\Delta H + B\Delta D$, 式中 A 和 B 为转换函数, 是位置(λ, φ)、深度(h)、频率(ω)或周期(T)和时间(t)的函数, 即

$$A = A(\lambda, \varphi, h, \omega, t), \quad B = B(\lambda, \varphi, h, \omega, t).$$

对于已知测点(λ_0, φ_0), 频率为 ω_j 的地磁场 \mathbf{F} 所对应的穿透深度为 $h_j = \sqrt{2/\omega_j\mu\sigma}$, 式中 μ 和 σ 分别为地下介质的磁导率和电导率.

根据转换函数 A 和 B 可计算得到威斯矢量的大小 L 和方向 α 分别为

$$L = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \alpha = \arctan \frac{B}{A}.$$

威斯矢量的大小 L 反映地下电导率的横向不均匀程度, 地下横向差异越大, 计算所得的威

滇西北地磁台阵的 8 个测点于 2008 年 10 月—2012 年 8 月陆续建设完成. 每个观测点安装一套由中国地震局地球物理研究所研制生产的 GM4 磁通门磁力仪, 其采样间隔为 1 s, 观测周期从 2 s 到数十分钟, 仪器的峰-峰值噪声小于 0.1 nT.

各测点产出的原始数据为 1 s 采样的地磁垂直分量(Z)、水平分量(H)和磁偏角(D)三分量的变化量. 因为原始数据不可避免地会受到外界人为活动的干扰, 所以需事先对原始数据进行人工预处理, 剔除明显由环境干扰引起的尖峰, 生成预处理秒采样数据, 然后经高斯滤波将其转换为预处理分数据. 后续的数据分析均基于预处理秒数据和分数据进行.

在滇西北地磁台阵的观测时段内, 该台阵区发生了两次 $M_s \geq 5.0$ 地震, 其震中

表 1 滇西北地磁台阵各测点与两次洱源地震震中的距离

Table 1 The distance between the epicenters of two earthquakes in Eryuan region and the geomagnetic station of norrthwestern Yunnan geomagnetic array

测点名称	距离 $M_s5.5$ 地震震中距/km	距离 $M_s5.0$ 地震震中距/km
丽江	122.66	118.71
云龙	32.86	42.85
下关	64.30	55.88
剑川	51.08	52.55
洱源	33.80	27.38
炼铁	15.73	11.52
牛街	54.69	50.29
鹤庆	82.41	77.34

斯矢量值越大；威斯矢量的方向则指向电导率低的方向，背离高导体方向。

2.2 谐波振幅比

对于随时间周期变化的不均匀场源，在地球介质为均匀各向同性平面导体的条件下，其满足

$$\begin{cases} \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} = \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} = i \frac{k}{\theta}, \\ \theta^2 = \sigma\mu\omega i + k^2, \end{cases} \tag{1}$$

式中： ω 为圆频率； k 为变化磁场的波数，此处为一常量； $Z(\omega)$ ， $H_x(\omega)$ 和 $H_y(\omega)$ 分别为地磁场垂直分量、南北向水平分量和东西向水平分量的频谱值。

地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} ， Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 分别定义为

$$Y_{ZH_x} = \left| \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} \right|, \quad Y_{ZH_y} = \left| \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} \right|, \quad Y_{HD} = \left| \frac{H_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|.$$

由式(1)可知， Y_{ZH_x} 和 Y_{ZH_y} 均与介质的视电阻率成正比，即当地球介质的视电阻率下降时， Y_{ZH_x} 和 Y_{ZH_y} 也随之下落。虽然理论上 $H_x(\omega)/H_y(\omega)=1$ (式(1))，但实际上地球介质具有各向异性的特征，即 $Z(\omega)/H_x(\omega) \neq Z(\omega)/H_y(\omega)$ ，并且 $H_x(\omega)/H_y(\omega)$ 与地下介质的各向异性有一定的关系，因此 $H_x(\omega)/H_y(\omega)$ 在地震孕育过程中的变化值得研究(冯志生等，2009)。

3 震例分析

为考察两次洱源地震前后地磁谐波振幅比的变化情况，本文计算了滇西北地磁台阵的洱源、云龙、牛街、下关、丽江等 5 个测点 2012 年 6 月 1 日—2013 年 5 月 31 日的谐波振幅比 Y_{ZH_x} ， Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 在周期为 3—60 分钟内的时间变化曲线。由于计算的时间长度只有

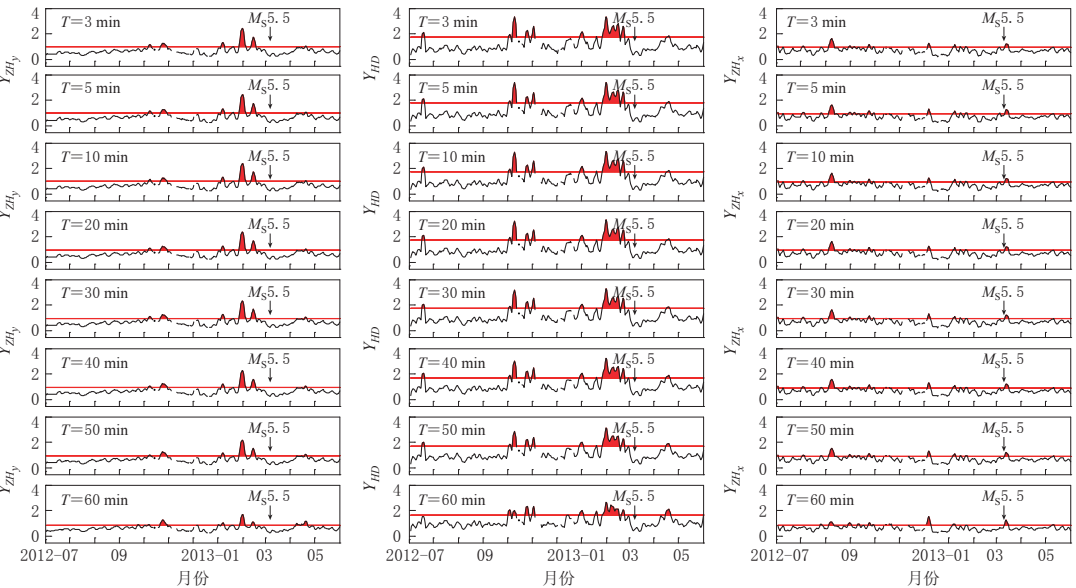


图 2 云龙测点不同周期 T 内 Y_{ZH_x} ， Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 变化曲线，图中红线为均值加 1 倍方差
Fig. 2 Temporal evolution of Y_{ZH_x} ， Y_{ZH_y} and Y_{HD} for different periods T observed by the station Yunlong where the horizontal red line is the average value plus the standard deviation

1 年, 无法像传统的谐波振幅比计算那样通过 12 个月滑动平均来消除年变, 所以仅对计算结果进行 5 天滑动平均. 此外, 同一测点各个周期的谐波振幅比变化比较类似, 仅异常幅度有所差异, 故本文只给出了云龙测点各个周期的计算结果, 如图 2 所示. 为了对比同一周期不同测点的谐波振幅比变化, 图 3 给出了各个测点周期为 10 分钟的结果(其它周期的结果也类似, 故未给出), 各子图中谐波振幅比曲线从上到下按距离洱源 $M_s5.5$ 地震的震中距由近及远排列. 剑川、炼铁、鹤庆测点的谐波振幅比曲线由于地震前后缺数较多, 故未给出.

图 4 给出了洱源 $M_s5.5$ 地震前各测点的谐波振幅比 Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 异常最高幅度随周期的变化结果. 另外, 统计了异常幅度与震中距的关系, 结果表明二者并不成简单的线性关系, 具体原因尚需进一步分析.

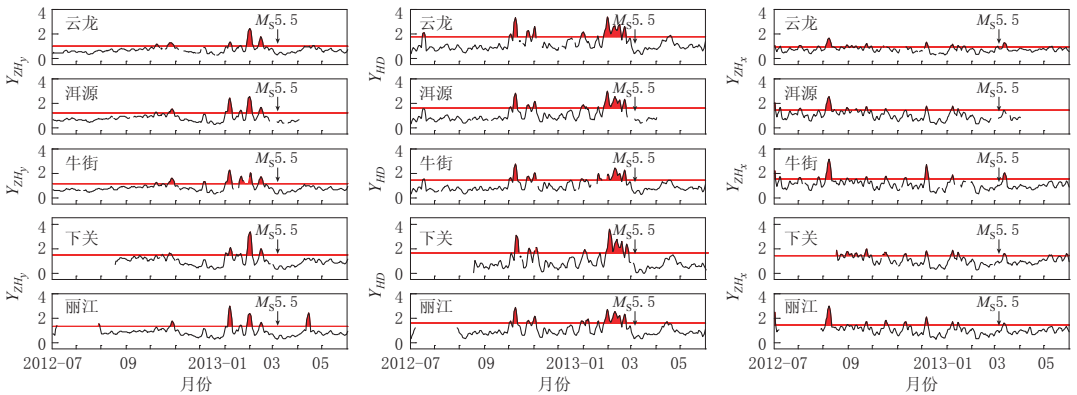


图 3 各测点周期为 10 分钟的 Y_{ZH_x} , Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 变化曲线, 图中红线为均值加 1 倍方差
Fig. 3 Temporal evolution of Y_{ZH_x} , Y_{ZH_y} and Y_{HD} at the period of 10 minutes for five geomagnetic stations (Yunlong, Eryuan, Niuji, Xiaguan, Lijiang from the top down), where the horizontal red line is the average value plus the standard deviation

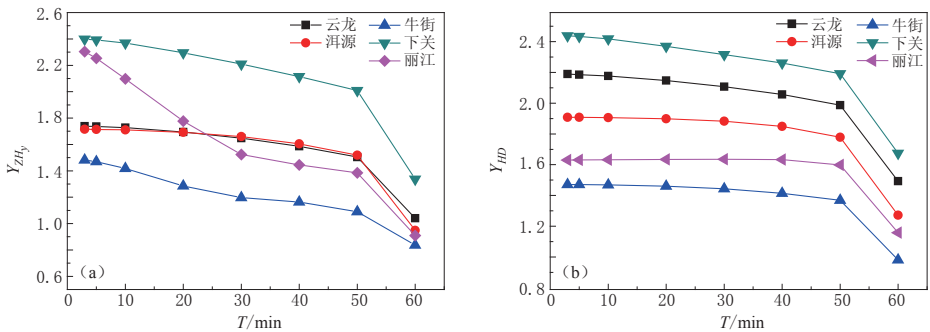


图 4 洱源 $M_s5.5$ 地震前各测点的 Y_{ZH_y} (a) 和 Y_{HD} (b) 异常最高幅度随周期 T 的变化
Fig. 4 Maximum amplitude of geomagnetic harmonic wave amplitude ratios Y_{ZH_y} (a) and Y_{HD} (b) for five geomagnetic stations versus the period T before Eryuan $M_s5.5$ earthquake

4 地下电导率结构定性分析

为了对本文得到的结果进行机理解释, 本文基于滇西北地磁台阵 8 个测点记录的数据对洱源地区的地下电性结构进行了定性分析. 图 5 给出了 2012 年 9 月 3 日滇西北地磁台

阵 8 个测点三分量 11:00—13:00(UT)的原始数据曲线。可以看出，同一时段的 H 和 D 分量变化形态大致相同，部分时段的 Z 分量变化曲线则呈明显的反向，即台阵西侧的云龙、剑川、炼铁台站与其东侧的洱源、牛街、下关、丽江和鹤庆台站的三分量变化方向相反，于是按照 Z 的变化方向将 8 个测点分为两组。由于滇西北地磁台阵位于地磁的中纬度地区，引起地磁短周期变化的外源场在地面 1000 km 范围内近似均匀，因此在间距仅为 30 km 左右的地磁台站记录到的短周期地磁变化异常是由地下电导率的横向不均匀性引起的。由台阵测点分布和上述测点的分组可大致推断，地下存在着近似南北走向的电导率异常带(关于该台阵区地下电导率结构将在另文讨论)，这与云南地区的观测结果(候作中，史铁生，1984；范国华等，1992)是一致的。

鉴于计算得到的不同周期威斯矢量分布结果比较类似，本文仅给出了周期为 10 分

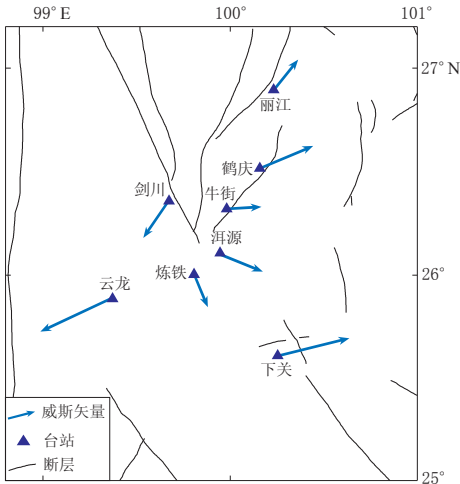


图 6 周期为 10 分钟的实威斯矢量分布图
Fig. 6 Distribution of Weiss vectors for the period of 10 minutes

所有台站的 Y_{ZH_y} 和 Y_{HD} 均表现出显著高值，发震前则刚好是由高转低再上升的一个转折点。基于谐波振幅比和地电阻率变化的震例研究(冯志生等，2004，2009，2013)表明，这种变化趋势正是震前谐波振幅比的变化特征。 Y_{ZH_x} 的变化曲线仅在 2012 年 8 月有所加强，且

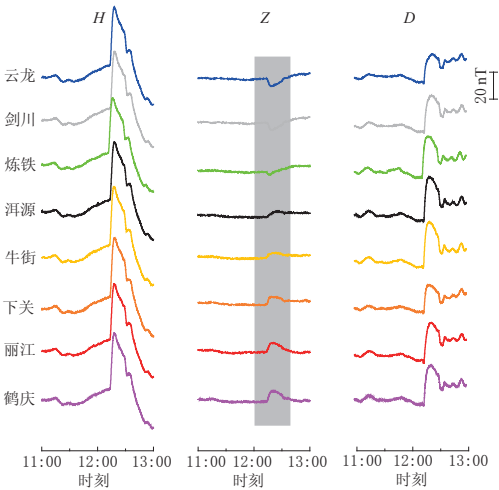


图 5 2012 年 9 月 3 日滇西北地磁台阵三分量的原始数据曲线(阴影区表示 Z 分量反向变化的时段)

Fig. 5 Temporal evolution of the original data recorded by the stations of northwestern Yunnan geomagnetic array on September 3, 2012
The shadow zone shows the period when Z component varied in opposite direction

钟的威斯矢量分布，如图 6 所示。威斯矢量的方向背离高导体的方向，从图中可以看出，在云龙、剑川与丽江、下关、牛街、鹤庆和洱源两组台站之间似乎有明显的分界线，即云龙、剑川台站的威斯矢量均指向西南，而丽江、下关、牛街、鹤庆和洱源台站的威斯矢量基本都指向东，这也从另一个角度佐证了洱源地区地下高导带的存在，其大致位置也可以由此确定。另外，炼铁台站的威斯矢量基本指向南，推测该台站也许位于高导带分界线附近。

5 讨论与结论

本文利用谐波振幅比方法分析了滇西北地磁台阵区发生的两次 $M_s \geq 5.0$ 地震，其谐波振幅比时序曲线显示，洱源 $M_s5.5$ 地震前

无后续的下降转上升的变化趋势. 本文给出的震前异常持续时间比冯志生等(2004, 2009, 2013)的研究结果短得多, 这是源于冯志生等(2004, 2009, 2013)关于震例分析的研究资料长达数年至十几年, 其采用 12 个月滑动平均方法来消除年变, 因此短周期信息在数据处理过程中得以平滑. 而本研究中, 由于台阵区部分测点仪器架设的时间不长, 只用了一年的数据进行震例分析, 因此无法进行 12 个月滑动平均, 仅对计算结果进行了 5 天滑动平均, 这样可以更好地保留短周期的信息. 虽然本文中给出的震前异常持续时间仅有 1 个多月, 但并不排除震前会出现持续时间较短的谐波振幅比异常, 这种现象尚需更多的震例来验证.

洱源 $M_s5.5$ 地震前的异常幅度随着周期的增大而减小, 这与龚绍京和陈化然(2001)的数值模拟结果“周期加大, 所有转换函数的绝对值变小”是一致的, 进一步验证了地震前高导异常的可靠性.

根据数值模拟计算结果, 感应矢量的极大值出现在靠近异常体边界处, 计算得到的谐波振幅比异常幅度最大的地磁测点也可能位于异常高导体边界附近, 而不一定位于异常高导体的中央, 因此谐波振幅比异常幅度与震中距之间并不成简单的线性关系, 还需要得到异常体的大致形状后进一步分析.

利用谐波振幅比方法得到的谐波振幅比曲线在 4 月 17 日洱源 $M_s5.0$ 地震前并未显示明显的异常, 这是由于该地震的发震时间和地点距离前一次地震(洱源 $M_s5.5$)较近, 前一次地震前后谐波振幅比出现了由高转低再上升的转折变化, 而且从低点上升的转折变化持续时间长达一个多月, 即使后一次地震(洱源 $M_s5.0$)前谐波振幅比同样出现了类似的趋势变化, 也被叠加在前一次地震的震后效应中导致无法辨识.

谐波振幅比与视电阻率的对应关系是在地球介质为均匀各向同性平面导体的条件下才满足的. 滇西北地磁台阵地下的电性结构存在横向不均匀性, 而 Y_{ZH_x} 和 Y_{ZH_y} 分别代表东西和南北两个正交方向上的视电阻率变化, 所以二者的时间变化不一致. 另一方面, 由于地下高导带近似南北走向, 因此南北向 Y_{ZH_y} 所呈现的显著震前异常现象也许与高导带的走向有密切联系. 南北向的 Y_{ZH_y} 有明显的震前异常, 地下电性介质的不均匀性也随之变化, 因此代表各向异性的 Y_{HD} 也在震前出现显著变化. 由此可以看出, 在这个震例中谐波振幅比的计算结果与台阵区地下的电性结构是一致的, 关于这个现象是否具有普遍性尚需更多震例验证.

根据震源模式的研究, 地震前震源区可能会膨胀进水(努尔-肖尔茨模式)或者小裂缝闭合(裂丛串通模式和预滑模式), 温度也可能会升高(预滑模式和松泽武雄热机理论). 在这些情况下, 震源区的电导率均会增大, 并逐渐形成一个高导异常区. 该异常区的形成会改变地球感应磁场的大小, 从而影响短周期地磁的变化特征, 谐波振幅比的大小也会随之改变. 因此, 谐波振幅比变化过程的研究可为地震预报提供判据.

参 考 文 献

- 车用太, 鱼金子. 2014. 地壳流体对地震活动的影响与控制作用[J]. 国际地震动态, (8): 1-9.
- Che Y T, Yu J Z. 2014. Influence and controlling of fluid in the crust on earthquake activity[J]. *Recent Developments in World Seismology*, (8): 1-9 (in Chinese).
- 范国华, 顾左文, 姚同起, 朱克佳. 1992. 云南地磁短周期变化异常及地下导电率结构[J]. 地震学报, 14(2): 201-210.
- Fan G H, Gu Z W, Yao T Q, Zhu K J. 1992. Geomagnetic variation anomaly and electric conductivity structure beneath

- Yunnan, China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **5**(4): 815–823.
- 冯志生, 梅卫萍, 张秀霞, 庄明龙, 张晓勇. 2004. 中强震前地磁谐波振幅比的趋势性变化特征初步研究[J]. 西北地震学报, **26**(1): 50–56.
- Feng Z S, Mei W P, Zhang X X, Zhuang M L, Zhang X Y. 2004. Preliminary study on the characteristics of long and medium term variation for the amplitude ratio of geomagnetic humorous wave before moderate-strong earthquakes[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **26**(1): 50–56 (in Chinese).
- 冯志生, 居海华, 李鸿宇, 张秀霞, 杨从杰, 立金柱. 2009. 地磁谐波振幅比异常特征的进一步研究及定性解释[J]. 华南地震, **29**(1): 17–23.
- Feng Z S, Ju H H, Li H Y, Zhang X X, Yang C J, Li J Z. 2009. Further study on characteristics of long-term and medium-term variations of geomagnetic harmonic wave amplitude ratios before moderate or strong earthquakes[J]. *South China Journal of Seismology*, **29**(1): 17–23 (in Chinese).
- 冯志生, 李鸿宇, 张秀霞, 梅卫萍, 叶碧文. 2013. 地磁谐波振幅比异常与强地震[J]. 华南地震, **33**(3): 9–15.
- Feng Z S, Li H Y, Zhang X X, Mei W P, Ye B W. 2013. The relationship between strong earthquake and geomagnetic harmonic wave amplitude ratio[J]. *South China Journal of Seismology*, **33**(3): 9–15 (in Chinese).
- 龚绍京, 陈化然. 2001. 水平场转换函数空间分布特征的数值模拟[J]. 地震学报, **23**(6): 637–644.
- Gong S J, Chen H R. 2001. Numerical modeling for the spatial distribution characteristics of horizontal field transfer function[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **23**(6): 637–644 (in Chinese).
- 郝锦绮, 黄平章, 张天中, 徐明发, 周建国, 马醒华. 1989. 岩石剩余磁化强度的应力效应[J]. 地震学报, **11**(4): 381–391.
- Hao J Q, Haung P Z, Zhang T Z, Xu M F, Zhou J G, Ma X H. 1989. The stress effect on remanent magnetization of rocks[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **11**(4): 381–391 (in Chinese).
- 候作中, 史铁生. 1984. 云南省的地磁短周期变化异常[J]. 地震学报, **6**(3): 287–293.
- Hou Z Z, Shi T S. 1984. Short-period geomagnetic variation anomaly of Yunnan Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **6**(3): 287–293 (in Chinese).