

doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2017.01.011

基于长周期视电阻率时间序列的 深部构造应力变化

——以沂沭断裂带北段为例

王庆林¹⁾ 孙怀凤²⁾ 朱成林¹⁾ 张继红¹⁾ 唐廷梅¹⁾

1) 山东省地震局, 济南 250014

2) 山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061

摘 要 几乎所有的破坏性地震都是由于板块构造运动产生的构造地震。板块构造运动会引起大地电性结构的改变, 研究两者之间的联系有助于强震预测。借鉴大地电磁测深法, 提出采用 Robust 估计技术计算地震台站长周期视电阻率的方法, 并采用数值试验模型对方法的灵敏度进行了验证。用文中提出的方法对安丘地震台站多年连续观测的长周期大地电磁数据进行了处理, 获得了视电阻率曲线, 同时提取了多个频点的视电阻率时间序列, 发现沂沭断裂带北段深部电阻率随时间变化逐渐升高。台站附近的 GPS 基线资料也揭示了断裂带两侧位移变小, 视电阻率时间序列结果与 GPS 观测地表形变具有很好的一致性。这与岩石力学实验中高温高压下, 深部岩石(上地幔) 受压会造成电阻率升高的结论是一致的。文中所述的方法对研究强震电磁前兆和强震预测具有参考价值。

关键词 长周期大地电磁 深部构造 视电阻率时间序列 应力变化 沂沭断裂带北段

中图分类号: P631.3⁺25

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2017)01-0147-11

0 引言

地电阻率是地震前兆电磁学科一个很重要的观测手段, 然而目前普遍是基于地球物理勘探中的对称四极观测方式, 该方法观测深度比较浅, 远小于震源的平均发震深度(朴化荣, 1990; 杜学彬等, 2008)。大地电磁测深是研究深部地球电性情况的有效手段, 被广泛应用于资源勘探以及地球深部构造的研究(Simpson *et al.*, 2005; Bedrosian, 2007; 董树文等, 2009, 2012; 刘营等, 2013)。利用该方法可以探测地壳深部乃至上地幔的电性结构信息和分布特征, 对研究接近孕震区部位的电性结构特征, 揭示孕震区域应力变化与电性变化的相关联系具有重要意义。如何利用大地电磁的连续观测数据监测和预测与地震活动相关的地球深部构造的电性结构变化(Eisel *et al.*, 2001; Kappler *et al.*, 2010) 是目前国际上的新兴课题之一, 欧洲和南美科学家发起的 IPOC 项目同样采用类似的方法研究板块的变化。

在大地电磁的连续观测方面, 国内外的研究都是近十几年发展起来的, 并且大部分研究集中在 2010 年之后。Eisel 等(2001) 利用美国加利福尼亚州中部地区的 2 个大地电磁连续观测台

(收稿日期) 2015-10-09 收稿, 2016-05-16 改回。

(基金项目) 中国地震局震情跟踪工作任务(2015010402)、山东省地震局青年基金(JJ1404Y) 与国家自然科学基金(41404104) 共同资助。

站 1996—1997 年的资料,研究了该地区的大地电磁转换函数时间变化特征并对其观测稳定性进行了分析(Eisel *et al.*, 2001)。德国波茨坦地学研究中心(GFZ German Research Centre for Geosciences)的 Brändlein 等(2010)研究了智利北部地区 2006 年以来,长达 730d 的大地电磁连续观测数据,并且在 2 次地震之间观测到了大地电磁转换函数 20s 周期处振幅的显著变化。Balasco 等(2008)利用 FIM 分析方法(Fisher Information Measure Analysis)研究了意大利南部 Val d'Agri 地区 1 个测点的视电阻率时间序列变化特征,发现视电阻率时间序列变化非常复杂,主要包含周期性和非周期性 2 种变化,而且浅层的周期性变化特征较强。Kappler 等(2010)利用美国加利福尼亚州帕克菲尔德地区 2 个超低频(ULF)大地电磁观测站的 2002—2005 年(在此期间发生了 2004 年 9 月 28 日的 M_6 地震)有效观测天数达 875d 的观测数据,对该地区的视电阻率时间序列进行了研究分析,发现了很多高频的变化,但是没有发现这种现象在地震前后有增强的特征,进一步的处理分析显示出很强的季节性变化,但是在该测点没有发现明显且合理的地震前兆性变化。2014 年 Gerardo Romano 等人对意大利南部 Val d'Agri 地区的连续大地电磁资料(2007—2011 年)进行了进一步的研究,发现短周期 16s 以内的视电阻率信号随着浅层土壤含水量的变化都呈现出较强的季节性变化特征,而 20~100s 的信号主要受全球地磁活动的影响(文中结合地磁 A_p 指数进行了分析)(Romano *et al.*, 2014)。

在国内,田山等(2009)对静海台 1a 的地电场与地磁场数据进行了联合分析处理,结果发现,在研究时段发生的卢龙 $M_L 4.2$ 地震前有多个频段的视电阻率提前 1 周出现了高值变化。赵国泽等(2010)利用大功率人工源极低频电磁技术(CSELF)在位于华北、华南、东北、西北和西南的 12 个地震台站和几个流动观测点进行了连续 30d 观测试验,发现 CSELF 技术可以采集到具有很高信噪比的电磁场数据,实验结果显示该技术在地震预测领域具有很大的潜力。

前人的研究多基于传统的大地电磁测深观测方式,资料的数量和观测时间都很大的局限性,近年来,中国地震台站注重长周期观测设施的建立,山东省地震局前兆台网拥有 7 个地磁场观测台和 7 个地电场观测台,其中有 6 个台站是地电场和地磁场同台观测,能够为研究提供良好的数据支持。本文采用的是地震台站长年独立观测的地电场和地磁场时间序列数据,提出采用 Robust 估计方法计算长周期视电阻率(Egbert *et al.*, 1986, 1992, 1996; Egbert, 1997; 叶高峰, 2013),首先采用数值试验的方法对其灵敏度进行研究和验证,然后对安丘地震台的地电场和地磁场数据进行联合处理,获得了视电阻率时间序列曲线,并与台站附近的 GPS 基线资料进行对比,最后结合岩石力学实验结果对这一现象进行了分析验证。

1 视电阻率时序特征曲线提取

本研究借鉴大地电磁测深的理论,联合处理同台观测的地磁场和地电场数据,获取视电阻率测深曲线以及时序序列。处理过程主要包括不同台站数据的格式统一化处理、资料筛选和视电阻率计算 3 个基本步骤。

1.1 不同台站数据统一化方法

地磁场观测资料以台网产出 H 、 D 、 Z 3 分量数据(绝对观测值或相对观测值均可)为例,一般磁偏角 D 的产出值为相对值,可以采用式(1)进行转换:

$$\begin{aligned} H_x &= H \cos(D + D') \\ H_y &= H \sin(D + D') \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中, H_x 为磁场 SN 分量, H_y 为磁场 EW 分量, H 为观测的水平分量, D 为该观测点的绝对观测磁偏角, D' 为磁偏角的相对变化量。

地电场的观测资料以台网产出的 E_{EW} 和 E_{SN} 为例, 由于实际观测系统并不一定是正南正北, 观测系统与地理方位有一定的夹角, 采用式(2)进行转换:

$$\begin{aligned} E_x &= E_{SN} \cos\theta + E_{EW} \sin\varphi \\ E_y &= E_{SN} \sin\theta + E_{EW} \cos\varphi \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, θ 、 φ 为观测系统 SN 向、EW 向与地理 SN 方向、EW 方向的夹角。通过这一步骤, 将台网产出的不同分量数据转换成地理坐标下的 H_x 、 H_y 、 E_x 、 E_y 分量。

1.2 资料筛选

由于大地电磁测深方法对资料的数据质量要求较高, 而地电场的观测资料易受天气、人文等因素的干扰(地震台站的地磁场观测仪器一般都放在专门的磁房中, 资料观测质量相对地电场要好很多), 因此需要对观测资料进行筛选。正因为地电场受干扰影响较大, 台站地电场观测一般都设置主、副测道, 即同一方向采用长、短 2 个不同极距进行观测, 长、短极距数据的日相关系数是衡量台站资料质量的 1 个比较基础的参数, 一般日相关系数低于 0.8 都会存在明显的干扰, 本文中也使用此方法对观测资料进行筛选。本例中也将日相关系数的阈值设为 0.8, 低于阈值的资料予以舍弃。

1.3 视电阻率计算与时间序列提取

在大地电磁观测的频率范围内, 假设观测的电磁场是由来自高空的电磁波在地球介质产生的感应电磁场, 并且满足平面波假设。取 x 轴向 N, y 轴向 E, z 轴的正方向垂直地面指向地心, 大地电磁测深的响应函数公式可以写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} E_x(\omega) \\ E_y(\omega) \\ H_z(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}(\omega) & Z_{xy}(\omega) \\ Z_{yx}(\omega) & Z_{yy}(\omega) \\ A(\omega) & B(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(\omega) \\ H_y(\omega) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)中, $H_i(\omega)$ ($i=x, y, z$) 和 $E_i(\omega)$ ($i=x, y$) 分别表示频率域的磁场和电场分量, x 、 y 和 z 表示相互正交的 3 个分量, ω 为圆频率, $Z_{ij}(\omega)$ ($i=x, y; j=x, y$) 表示阻抗值, $A(\omega)$ 和 $B(\omega)$ 为 2 个倾子分量。

根据式(3)可以得到大地电磁测深阻抗的表达式:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad (4)$$

$$Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x} \quad (5)$$

视电阻率可以根据式(6)计算得来:

$$\rho = 0.2T |Z|^2 \quad (6)$$

由于本文的主要目的是分析视电阻率时间序列多年来的变化趋势, 因此文中的视电阻率直接采用观测方向的视电阻率计算结果, 并未对其进行旋转。

大地电磁测深数据处理中, 传统的阻抗计算一般采用最小二乘法(田山等, 2009), 然而最小二乘法的稳定性和适应性差, 对于局部相关噪声强的电磁观测资料, 容易出现结果分散或者偏离, 远参考技术和 Robust 技术能够较好地克服这个问题(杨生等, 2002; 汤井田等, 2013)。

远参考技术采用先设置 1 个与原信号场源相关而噪声不相关的远参考信号,然后将此参考信号与实测点数据进行相关处理,使得关系式中不再出现自相关项,从而有效降低不相关噪声的影响。Robust 技术是通过降低残差大数据点的权重,来降低异常数据带来的影响。由于本研究采用的资料为各地震台站独立观测,台站之间数据采集没有精确同步,因此数据处理过程中并没有加入远参考技术。

本文首先采用上述技术原理利用地磁场和地电场的的数据计算视电阻率曲线,然后提取出同一频率的视电阻率值绘制该频率的视电阻率时间序列。在没有较大构造活动和深部环境变化的基础上,同一频率的视电阻率始终反映同一深度的电性结构信息。

2 实际资料处理与结果分析

首先利用一维大地电磁数值模拟的方法,建立 2 个一维地电阻率模型,对模型指定层位电阻率进行扰动,分析其变化灵敏度。然后以沂沭带北段的安丘台为例,提取该台站 2011—2014 年的视电阻率时间序列,最后结合附近的 GPS 基线资料分析沂沭带北段的应力状态。

2.1 数值模拟实验

采用一维大地电磁数值模拟方法对 2 个模型的视电阻率响应灵敏度进行了分析。模型一在 20~30km 深度设置了 1 个低阻层($50\Omega\cdot\text{m}$),模型二则在 20~30km 深度设置了 1 个高阻层($5000\Omega\cdot\text{m}$),然后对 50~150km 深度的地层电阻率加入 10%的扰动,进而计算其大地电磁响应曲线。如图 1 所示,2 个模型的响应曲线都在 100~1000s 周期段产生了比较明显的变化。图中可以很明显地看出变化最灵敏的并不是 1000s 的周期,但是由于台站仪器是 60s 采样,几百 s 周期的响应稳定性比较差,故而此处以 1000s 周期为例进行说明。对于 1000s 周期的响应,模型一分别对应上升 1.87%和下降 2.29%,模型二则分别对应上升 1.99%和下降 2.37%。该数值模拟实验表明模型深部地电阻率的扰动变化可以产生比较明显的视电阻率变化,因此本文计算得出的长周期视电阻率时间序列是可以反映出地球深部地电阻率变化的。

2.2 安丘台视电阻率时间序列

利用本方法计算了多个台站的资料,山东省内的安丘台、莒县台、郯城台以及江苏省的高邮台;其中山东的 3 个台都呈上升趋势,且以安丘台为最大,江苏高邮台没有明显的趋势性变化。本文以安丘台的计算结果为例进行分析。安丘地震台(图 2)是国家基本台,位于沂沭断裂带北端的安丘-莒县断裂上。安丘-莒县断裂走向为 $N 10^{\circ}\sim 30^{\circ}E$,产状近于直立,沿断层走向在地貌上呈陡坎地形。断层西盘为白垩系上统王氏组褐色、紫红色含砾砂岩地层,东盘为王氏组灰绿色、紫灰色页岩夹粉砂岩地层。

由于资料采样率较低(分钟采样),每天只有 1440 个采样点,因此本例中以周为计算单位,每周计算 1 条视电阻率曲线,总共计算了 15 个频点(216.3~6144s),共计 208 条视电阻率曲线(删除掉数据质量较差的 4 条后,有效条数为 204 条),然后绘制各个频点的视电阻率时间序列。

图 3 展示了从 208 条测深曲线中随机挑选的 4 条视电阻率曲线(每年选 1 条),此处笔者从 15 个频点中挑选出 5 个相对稳定的频点进行时间序列的分析研究。图 4 为该台自 2011 年以来 EW、SN 2 个方向(图示为 x_y 、 y_x)周期为 903.5~2560s 的视电阻率变化曲线。从图中可以看出,2 个方向的视电阻率都呈现趋势上升变化,随着周期的增大,也就是深度的增大,上升趋势

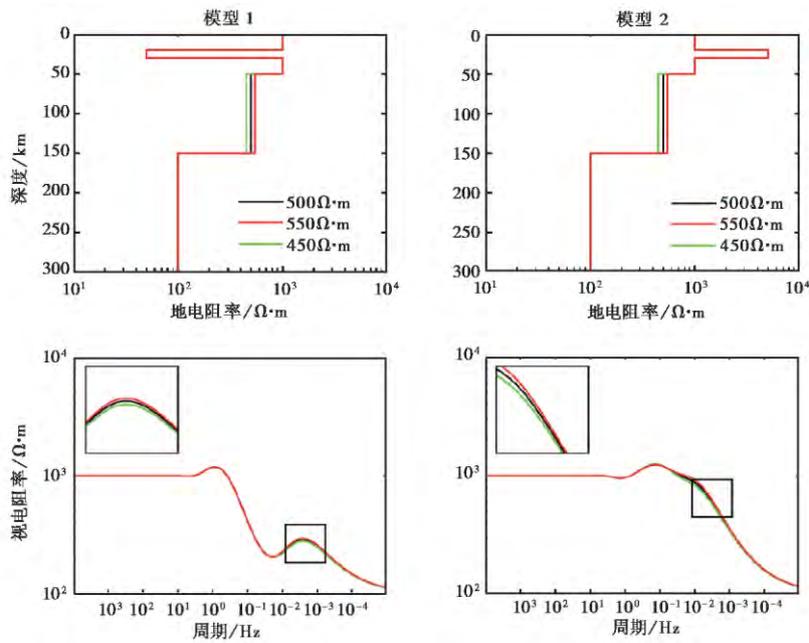


图 1 地电阻率模型以及视电阻率响应曲线

Fig. 1 Earth resistivity model and apparent resistivity response curve.

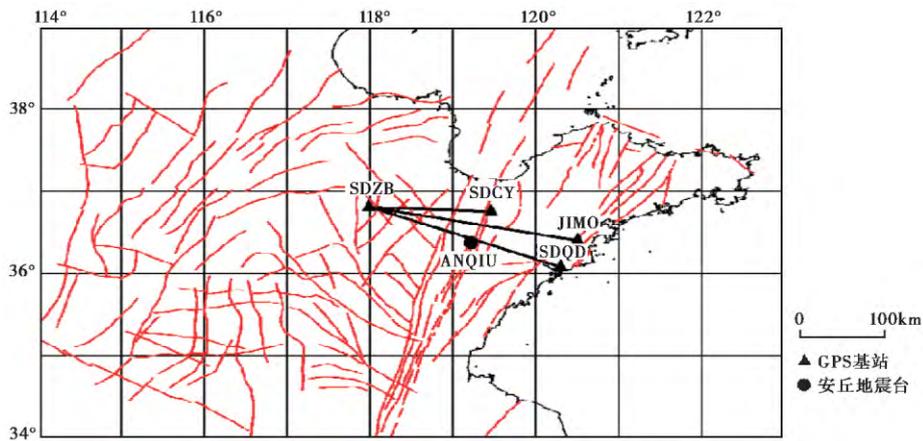


图 2 安丘地震台站、GPS 基站以及断裂位置图

Fig. 2 Position of Anqiu seismic station, GPS station and the fault zone.

势逐渐减小(斜率减小),最后趋于水平,且SN向比EW向稳定很多(均方根误差较小)。由于本资料采样间隔较大,高频的资料效果较差,图示最短周期为903.5s(T7),根据趋肤深度公式估算(电阻率取10~100Ω·m),深度为50~150km,该频段反映的是地球深部(下地壳至上地幔)的电性结构信息,更长周期的时间序列则主要反映上地幔的电性结构信息,因此,该变化趋势主要受地球深部高温高压环境的影响。下面将结合GPS解算的结果以及一些岩石力学实验的结论进行分析讨论。

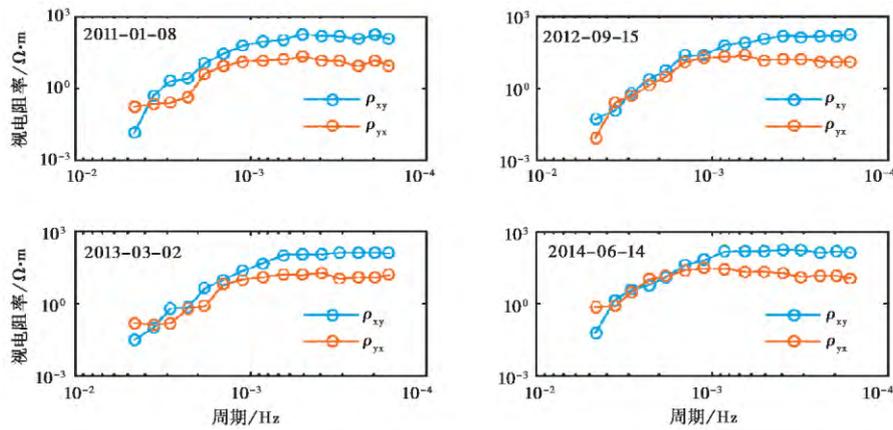


图3 安丘台视电阻率曲线示例

Fig. 3 Examples of apparent resistivity curve from Anqiu seismic station.

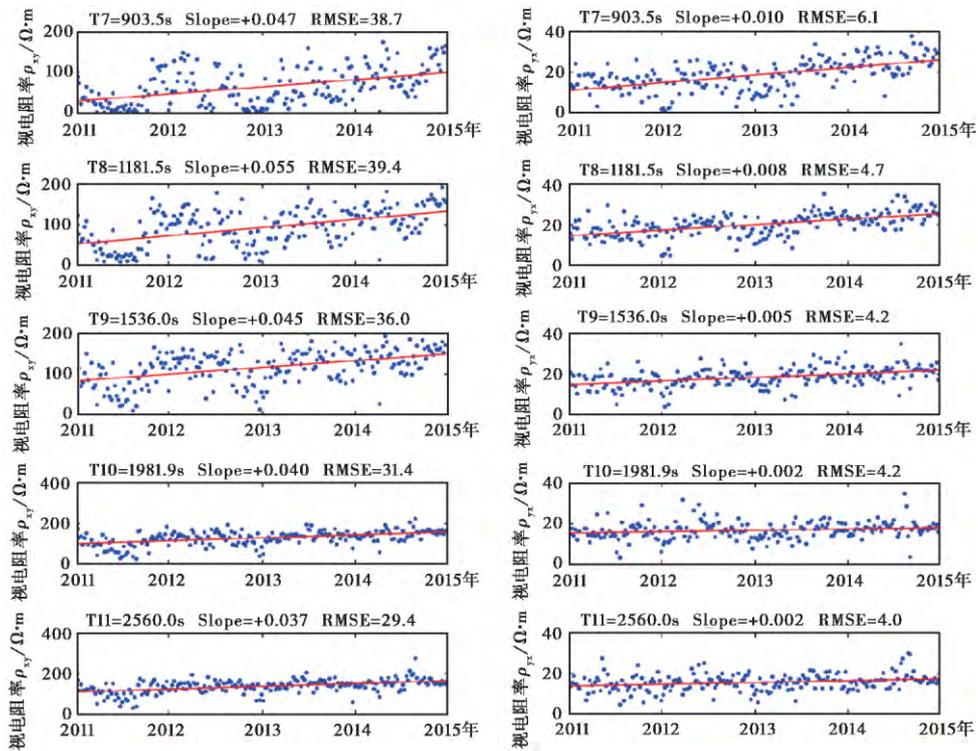


图4 安丘台视电阻率时间序列

Fig. 4 Apparent resistivity time series of Anqiu seismic station.

蓝点为计算出的原始视电阻率值, 红线为直线拟合结果

2.3 GPS 基线资料对比

近年来, GPS 资料被广泛应用于地区形变场、构造应力场以及板块相对运动等的研究中 (刘峡等, 2006; 李开洋等, 2014)。本文仅引用 GPS 资料作为文章结论的证据之一, 故此处仅

对 GPS 基线资料进行展示和结论分析。本例中所采用的 GPS 基线资料是利用 GNSS 路态网山东省的资料进行解算的,数据长度为 2011 年 1 月 1 日至 2014 年 9 月 7 日,在此期间会有因观测问题导致的缺数。本例选择了沂沭带北段基站的基线数据,以更好地与深部视电阻率资料进行对比。图 5 为 GPS 数据解算出的 3 个基站(JIMO、SDCY、SDQD) 相对于 SDZB 基站的 SN 和 EW 2 个方向的跨断层基线值。

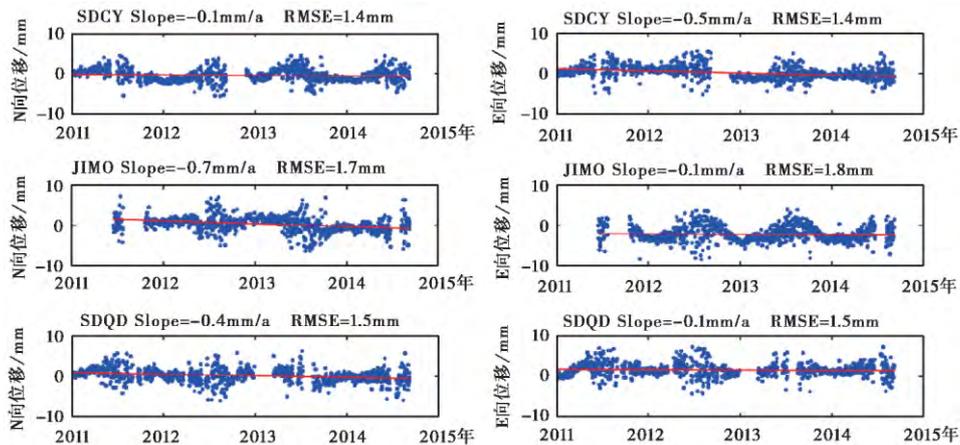


图 5 SN、EW 方向的 3 条 GPS 基线时间序列

Fig. 5 3 GPS baseline time series in SN and EW directions.

蓝点为解算出的原始基线值时间序列,红线为直线拟合结果

从图 5 可以看出,3 条基线值的 2 个方向(SN、EW) 斜率都为负值且绝对值较小,反映了断层两盘为压性变化,而且这种挤压运动并不强烈。GPS 观测的是地表的运动状态,而视电阻率时间序列资料反映的是地球深部的构造以及环境变化特征,在运动状态上,地表和地球深部应该是紧密联系的。

2.4 结果对比分析

国内外大量岩石力学实验表明,岩石电阻率受岩性、温度、压力、含水量、孔隙度等多种因素影响(Brace *et al.*, 1968; Yamazaki, 1977; 陈大元等, 1987; 李金铭, 2005; 杨晓志, 2014; Selway, 2014)。杨晓志(2014) 有关电导岩石学综述性文章中指出,地球深部的岩石处在高温高压的环境下,其电导率主要受温度和压力的影响,而且温度的影响要远大于压力的影响。Selway(2014) 在有关岩石电导率异常原因探讨的文章中也提到,下地壳至上地幔的岩石电阻率主要受温度和名义上无水矿物氢含量的影响,文中对这 2 点,结合深部热剖面的资料展开进一步探讨,发现地球深部温度环境相对稳定,得出了深部岩石电导率最终受构造运动的影响较大的结论。地球深部的构造运动和环境非常复杂,在温度相对稳定的前提下,由于岩石岩性和所处温度环境的不同,压力对电阻率的影响也不一样,各种岩石力学的实验结果也存在一定的差异。然而多数实验结果表明,在下地壳随着压力的增大,电阻率是下降的;而在上地幔,随着压力的增加,电阻率是上升的(杨晓志, 2014)。

在利用数值模拟验证了方法灵敏度的基础上,结合 GPS 基线观测以及高温高压岩石力学实验 2 种研究结果,下面展开进一步分析。图 4 中展示的 5 个频点视电阻率时间序列都呈上升

的趋势,且以 T7—T9 3 个频点斜率最大。将图 4 的 T7—T9 3 个频点的时间序列与图 5 的 3 条基线进行对比,可以发现 GPS 基线显示断层两侧为轻微挤压状态,运动年速率为 mm 级(目前我们尚不能获知需要多大的绝对压力会引起这个量级的应变速率),图 4 显示视电阻率呈上升趋势,与岩石力学实验中上地幔岩石电阻率的实验结论相吻合,即在上地幔中,压力增大,岩石电阻率上升。本文的研究结果与岩石力学实验以及 GPS 观测结果可以相互印证。

3 结论与讨论

本文利用安丘地震台站的长周期大地电磁场数据对测区的深部视电阻率时间序列进行了计算分析,以沂沭断裂带北段为例分析了大地电磁监测数据与地球深部应力变化的关系。通过计算发现:采用长周期视电阻率时间序列的计算结果与 GPS 解算结果一致,电阻率升高与断层受压变化之间的联系和岩石力学实验的结论是吻合的。最终显示在长趋势变化上,2 种资料呈现出较强的一致性。该对比结果表明本方法计算结果的正确性,也进一步说明本研究可以为动态监测深部电性结构变化提供 1 种有效的手段,而且随着未来仪器设备的升级改造,以及采样率的进一步提高,该方法在地震电磁前兆和地震预测方面将更具潜力和优势。

本研究采用天然源大地电磁场的观测数据,信噪比较低,观测频带较窄,计算出来的视电阻率时间序列存在很大的起伏波动,而人工源大地电磁测深的结果要稳定很多。因此,在深部电性结构的动态监测方面,基于人工源的极低频大地电磁方法(CSELF)也具有很大的优势。由于本文研究的时间和深度有限,对于各频点变化趋势不一致的情况目前尚未有很好的解释。另外,本文的结果和结论是基于安丘台的观测数据计算得来的,尚未在全国范围内进行更多的分析和验证,在未来的研究中将会把这 2 个问题作为重点方向进行探讨和研究。

致谢 中国地震局地质研究所汤吉研究员在计算过程中给予了指导和建议,俄勒冈州立大学 Gary D Egbert 教授在大地电磁数据处理方面给予了帮助,在此一并致谢;文中部分图片采用 GMT 和 Gnuplot 开源软件绘制;感谢审稿专家提出的宝贵建议。

参 考 文 献

- 陈大元,陈峰,贺国玉. 1987. 岩石受压过程中“应力反复”对电阻率的影响 [J]. 地震学报,9(3): 303—311.
CHEN Da-yuan, CHEN Feng, HE Guo-yu. 1987. Influences of “stress reversal” on rock resistivity during loading procedure [J]. Acta Seismologica Sinica, 9(3): 303—311(in Chinese).
- 董树文,李廷栋. 2009. SinoProbe: 中国深部探测实验 [J]. 地质学报,83(7): 895—909.
DONG Shu-wen, LI Ting-dong. 2009. SinoProbe: The exploration of the deep interior beneath the Chinese continent [J]. Acta Geologica Sinica, 83(7): 895—908(in Chinese).
- 董树文,李廷栋,陈宣华,等. 2012. 中国深部探测技术与实验研究进展综述 [J]. 地球物理学报,55(12): 3884—3901.
DONG Shu-wen, LI Ting-dong, CHEN Xuan-hua, et al. 2012. Progress of deep exploration in mainland China: A review [J]. Chinese J Geophys, 55(12): 3884—3901(in Chinese).
- 杜学彬,叶青,马占虎,等. 2008. 强地震附近电阻率对称四极观测的探测深度 [J]. 地球物理学报,51(6): 1943—1949.
DU Xue-bin, YE Qing, MA Zhan-hu, et al. 2008. The detection depth of symmetric four - electrode resistivity

- observation in/near the epicentral region of strong earthquakes [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51(6): 1943—1949 (in Chinese).
- 李金铭. 2005. 地电场与电法勘探 [M]. 北京: 地质出版社.
- LI Jin-ming. 2005. *Geoelectric Field and Electrical Exploration* [M]. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 李开洋, 王成虎, 邢博瑞, 等. 2014. 郯庐断裂带区域应力状态研究综述 [J]. *大地测量与地球动力学*, 34(6): 1—8.
- LI Kai-yang, WANG Cheng-hu, XING Bo-rui, *et al.* 2014. Review of regional stress state of Tanlu fault belt [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 34(6): 1—8 (in Chinese).
- 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 2006. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场 [J]. *大地测量与地球动力学*, 26(3): 33—39.
- LIU Xia, FU Rong-shan, YANG Guo-hua, *et al.* 2006. Deformation field and tectonic stress field constrained by GPS observations in North China [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 26(3): 33—39 (in Chinese).
- 刘营, 徐义贤, 张胜业, 等. 2013. 华南地区岩石圈电性特征及其地球动力学意义 [J]. *地球物理学报*, 56(12): 4234—4244.
- LIU Ying, XU Yi-xian, ZHANG Sheng-ye, *et al.* 2013. Lithospheric electrical characteristics in South China and its geodynamic implication [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(12): 4234—4244 (in Chinese).
- 朴化荣. 1990. 电磁测深法原理 [M]. 北京: 地质出版社.
- PIAO Hua-rong. 1990. *Principle of Electromagnetic Sounding* [M]. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- 汤井田, 张弛, 肖晓, 等. 2013. 大地电磁阻抗估计方法对比 [J]. *中国有色金属学报*, 23(9): 2351—2358.
- TANG Jing-tian, ZHANG Chi, XIAO-Xiao, *et al.* 2013. Comparison of methods for magnetotelluric impedance estimation [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 23(9): 2351—2358 (in Chinese).
- 田山, 汤吉, 王建国, 等. 2009. 电磁场定点连续观测在地震预测研究中的应用 [J]. *地震地质*, 31(3): 551—558. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2009.03.016.
- TIAN Shan, TANG Ji, WANG Jian-guo, *et al.* 2009. Continuous electromagnetic measurement at stationary stations and its application to earthquake prediction research [J]. *Seismology and Geology*, 31(3): 551—558 (in Chinese).
- 杨生, 鲍光淑, 张全胜. 2002. 远参考大地电磁测深法应用研究 [J]. *物探与化探*, 26(1): 27—31.
- YANG Sheng, BAO Guang-shu, ZHANG Quan-sheng. 2002. A study on the application of remote reference magnetotelluric sounding technique [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 26(1): 27—31 (in Chinese).
- 杨晓志. 2014. 电导岩石学: 原理、方法和进展 [J]. *中国科学(D 辑)*, 44(9): 1884—1900.
- YANG Xiao-zhi. 2014. Electrical petrology: Principles, methods and advances [J]. *Science in China(Ser D)*, 44(9): 1884—1900 (in Chinese).
- 叶高峰, 王辉, 郭泽秋, 等. 2013. 长周期大地电磁测深数据采集及处理技术 [J]. *地球物理学进展*, 28(3): 1219—1226.
- YE Gao-feng, WANG Hui, GUO Ze-qiu, *et al.* 2013. Data acquisition and processing technology of long-period magnetotellurics [J]. *Progress in Geophysics*, 28(3): 1219—1226 (in Chinese).
- 赵国泽, 王立凤, 汤吉, 等. 2010. 地震监测人工源极低频电磁技术(CSELF)新试验 [J]. *地球物理学报*, 53(3): 479—486.
- ZHAO Guo-ze, WANG Li-feng, TANG Ji, *et al.* 2010. New experiments of CSELF electromagnetic method for earthquake monitoring [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(3): 479—486 (in Chinese).

- Balasco M , Lapenna V , Lovallo M , *et al.* 2008. Fisher information measure analysis of Earth's apparent resistivity [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences* , 5(3) : 230—236.
- Bedrosian P A. 2007. MT+ , Integrating magnetotellurics to determine earth structure , physical state , and processes [J]. *Surveys in Geophysics* , 28(2-3) : 121—167.
- Brändlein D , Ritter O , Weckmann U , *et al.* 2010. A permanent array of magnetotelluric stations located at the South American subduction zone in Northern Chile [C]. *EGU General Assembly 2010. Vol.12 , EGU2010-4206.*
- Brace W F , Orange A S. 1968. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding [J]. *Journal of Geophysical Research* , 73(4) : 1433—1445.
- Egbert G D. 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing [J]. *Geophysical Journal International* , 130(2) : 475—496.
- Egbert G D , Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions [J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* , 87(1) : 173—194.
- Egbert G D , Booker J R , Schultz A. 1992. Very long period magnetotellurics at Tucson Observatory: Estimation of impedances [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* , 97(B11) : 15113—15128.
- Egbert G D , Livelybrooks D W. 1996. Single station magnetotelluric impedance estimation: Coherence weighting and the regression M-estimate [J]. *Geophysics* , 61(4) : 964—970.
- Eisel M , Egbert G D. 2001. On the stability of magnetotelluric transfer function estimates and the reliability of their variances [J]. *Geophysical Journal International* , 144(1) : 65—82.
- Kappler K N , Morrison H F , Egbert G D. 2010. Long-term monitoring of ULF electromagnetic fields at Parkfield , California [J]. *Journal of Geophysical Research* , 115(B4) : 2500—2522.
- Romano G , Balasco M , Lapenna V , *et al.* 2014. On the sensitivity of long-term magnetotelluric monitoring in Southern Italy and source-dependent robust single station transfer function variability [J]. *Geophysical Journal International* , 197(3) : 1425—1441.
- Selway K. 2014. On the causes of electrical conductivity anomalies in tectonically stable lithosphere [J]. *Surveys in Geophysics* , 35(1) : 219—257.
- Simpson F , Bahr K. 2005. *Practical Magnetotellurics* [M]. Cambridge University Press.
- Yamazaki Y. 1977. Tectonoelectricity [J]. *Geophysical Surveys* , 3(2) : 123—142.

DEEP TECTONIC STRESS CHANGE BASED ON LONG-TERM APPARENT RESISTIVITY TIME SERIES: A CASE STUDY FROM NORTH SECTION OF YISHU FAULT ZONE

WANG Qing-lin¹⁾ SUN Huai-feng²⁾ ZHU Cheng-lin¹⁾
ZHANG Ji-hong¹⁾ TANG Ting-mei¹⁾

1) Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China

2) Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China

Abstract

Almost all the destructive earthquakes, so called tectonic earthquake, are produced by tectonic movement. The tectonic movement will cause resistivity changes in the earth. It's valuable for strong earthquake forecast to study the relationship between the resistivity change and tectonic movement. According to magnetotelluric sounding method, we establish a robust estimate method to calculate the long-term apparent resistivity from seismic station monitoring data. We first use 1D layered earth models to test the sensitivity of this method. Then we process the continually observed long term electromagnetic data in 4 years (from 2011 to 2014) from Anqiu seismic station which is very close to the north section of Yishu fault zone. The apparent resistivity curves and the apparent resistivity time series for different frequencies are obtained. The time series show the resistivity increase in the selected 4 years, which is in good agreement with the GPS baseline data. This also satisfies the results from rock mechanics experiments on deep rocks (upper mantle) that the resistivity will increase with improved stress in a high temperature and pressure environment. The method is valuable for studying electromagnetic precursor of strong earthquakes and strong earthquake prediction.

Key words long-term magnetotelluric, deep tectonics, apparent resistivity time series, stress change, north section of Yishu fault zone

(作者简介) 王庆林,男,1989年生,2013年于长安大学获固体地球物理学专业硕士学位,助理工程师,现主要从事地震电磁学研究,电话:0531-58622025,E-mail: chd_wql@qq.com。