

沈红会, 王丽, 王维, 李鸿宇, 孙春仙, 叶碧文. 2017. 地电阻率长趋势变化及其预测意义. 地震学报, 39(4): 495–505.
doi:10.11939/jass.2017.04.005.

Shen H H, Wang L, Wang W, Li H Y, Sun C X, Ye B W. 2017. Long-term trending variation of georesistivity and its implication to earthquake prediction. *Acta Seismologica Sinica*, 39(4): 495–505. doi:10.11939/jass.2017.04.005.

地电阻率长趋势变化及其预测意义^{*}

沈红会¹⁾ 王丽²⁾ 王维¹⁾ 李鸿宇¹⁾
孙春仙¹⁾ 叶碧文¹⁾

1) 中国南京 210014 江苏省地震局

2) 中国南京 210014 南京基准地震台

摘要 为了深入研究地电阻率1年尺度以上趋势变化的区域性和同步性, 本文从地电阻率与水位、水准的关系以及地电阻率固体潮现象的角度, 通过理论、实验、实例分析了地电阻率趋势变化产生的原因。分析结果显示, 地电阻率趋势变化与观测系统或水位(非构造水位)无关, 而与周围构造变化有关, 且趋势上升和下降分别反映了周围应力场的压性和张性变化。在此基础上, 以高邮台和成都台为例, 从地电阻率与周围地震的关系分析了地电阻率趋势变化的场兆特征, 结果表明地电阻率在上升趋势转折时更具有短期的预测意义。本文结果可以为研究地电阻率的长期趋势变化现象提供参考; 未来地震的预测需在综合各台站观测结果的基础上才能有效地判定区域应力场的方向和相对幅度, 从而给出有意义的地震前兆预测结果。

关键词 地电阻率 趋势变化 应力场 地震预测

doi:10.11939/jass.2017.04.005 中图分类号: P315.72⁺2 文献标志码: A

Long-term trending variation of georesistivity and its implication to earthquake prediction

Shen Honghui¹⁾ Wang Li²⁾ Wang Wei¹⁾
Li Hongyu¹⁾ Sun Chunxian¹⁾ Ye Biwen¹⁾

1) Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China

2) Nanjing Standard Seismic Station, Nanjing 210014, China

Abstract: The trend variations in the earth-resistivity over one year scale are observed in large quantities. This trend variation is regional and synchronous. In order to study this phenomenon, this paper analyzes the reasons for the trend variation of resistivity from the view points of the relationship between water level and ground resistivity, and between ground level and resistivity, as well as the earth tide phenomenon of ground resistivity through the theory, experiment and example analysis. It is considered that the trend variation is independent of

* 基金项目 中国地震局震情任务跟踪重点项目(1530503)资助。

收稿日期 2017-01-12 收到初稿, 2017-06-18 决定采用修改稿。

† 通讯作者 e-mail: shhmouse@sina.com



the observation system or the water level (non-tectonic water level), but relate to structural change. The rising and falling trend respectively reflect the compressional and extensional variation of stress field around. Furthermore, taking the stations Gaoyou and Chengdu as examples, the characteristics of the resistivity trend are analyzed based on the relationship between the surrounding earthquakes and the resistivity. The result shows that the uptrend turning has short-term predictive implication, which can provide a reference for the research on the long-term trend of resistivity. The future earthquake prediction needs to be integrated with the observation results of each station, which can effectively determine the direction and the relative amplitude of regional stress field, so as to give some significant results of earthquake precursor and prediction.

Key words: georesistivity; trend variation; stress field; earthquake prediction

引言

我国长达 40 年的地震地电阻率观测实践表明, 地电阻率除了正常的年变形态(少数没有年变)以外, 主要存在两种异常变化(杜学彬, 2010): 其一是破年变变化, 一般表现为破年变的漏斗型下降变化, 反映震前震源附近因微破裂电性溶液渗透所导致的地电阻率下降过程, 这一点在实验室(陆阳泉, 温新民, 1980)以及诸如唐山(钱复业等, 1990)、汶川(钱家栋等, 2013)等地震前的实际观测中均得到了很好的体现, 一般这种破年变下降异常所对应地震的震级比较大, 距离震源也比较近; 其二是年变化形态完整超过 1 年尺度的趋势变化, 有呈下降, 也有呈上升的, 且这种变化在几年周期内往往接近线性。实际观测中, 由于观测场地与震源之间的距离较大且大震强震比较稀少, 破年变异常一般是震源附近因破裂导致的地电阻率大幅下降变化, 所以很少能观测到真正的地电阻率破年变异常, 但 1 年尺度以上的趋势变化现象非常多, 而且当这种趋势发生转折时, 周围有时发生地震, 有时却无明显的地震对应。在日常会商和年度会商中, 很多时候会将这种趋势变化作为背景异常进行跟踪, 但一般均未给出明确的预测意义。

为了进一步明确地电阻率长趋势变化的预测意义, 本文将主要就地电阻率的趋势变化进行深入分析, 并对其机理和前兆意义进行探讨, 以期为地震趋势会商和预报服务。

1 地电阻率趋势变化现象

绝大部分地电阻率观测场地在长期观测中均存在几年尺度的趋势变化现象, 从图 1 所示的新沂、蒙城、郯城等 3 个台站的 EW 向地电阻率长期观测曲线上可以清楚地看到。

根据图 1 所示的分布在我国 3 个省区的新沂台、蒙城台和郯城台地电阻率月均值曲线, 再加上近年来对全国其它台站的地电阻率曲线变化的观测研究可知, 全国地电阻率趋势变化总体上呈现以下几个特征: ① 趋势变化表现为 1 年周期以上的变化, 一般不影响年变化特征; ② 几年尺度的趋势变化在一定时间内基本呈近线性变化; ③ 同一场地趋势变化在方向和相位上均存在不同步现象, 尤其是在趋势方向上大都表现不同; ④ 不同场地的趋势变化存在相位较同步的现象, 但方向上未必相同, 如图 1 所示, 大约在 2005 年和 2011 年存在同步的趋势转折现象。

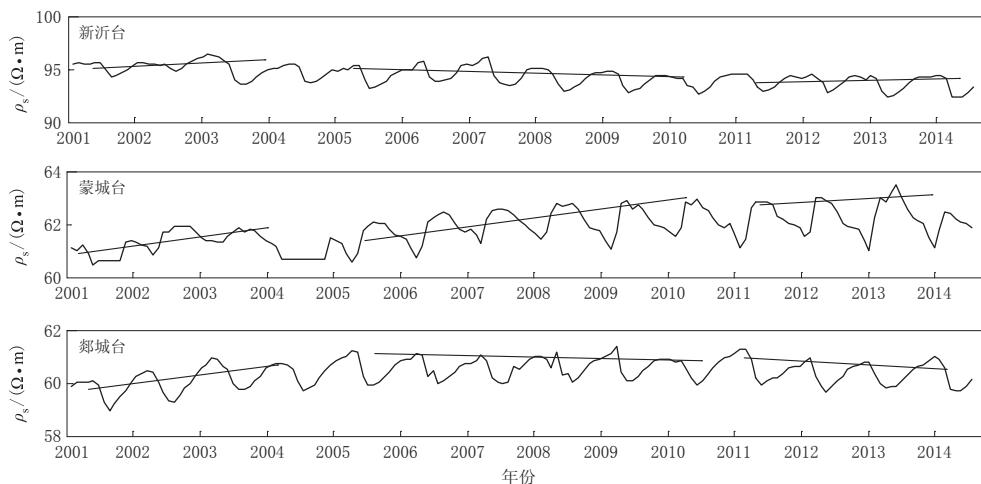


图 1 新沂、蒙城、郯城台 EW 向地电阻率月均值曲线

Fig. 1 Monthly mean value curves of georesistivity in EW direction at the stations Xinyi (upper), Mengcheng (middle) and Tancheng (lower)

2 地电阻率趋势变化原因分析

对地电阻率长期趋势变化的产生原因一直存在不同看法。一种观点认为地电阻率长期趋势变化与周围水位有关(郑文俊等, 2007; 张国苓等, 2013)。一般地下水的上升和下降对电阻率观测会造成一定影响, 主要是对年变化的影响, 但绝不是造成趋势变化的根本原因。很多台站地电阻率 NS 向与 EW 向的趋势变化方向往往并不一致, 而水位引起的变化方向应该是一致的(电性结构类似情况下); 再者, 进一步研究表明非构造水位变化引起的趋势变化方向和幅度经常与所观测到的地电阻率趋势变化相矛盾, 而且大面积的地电阻率场地接近同步趋势转折变化更是表明与水位无关。例如, 江苏省历史上因苏北地下水开采和苏南停止地下水开采造成苏北水位长期趋势下降和苏南水位长期趋势上升, 但江苏 5 个

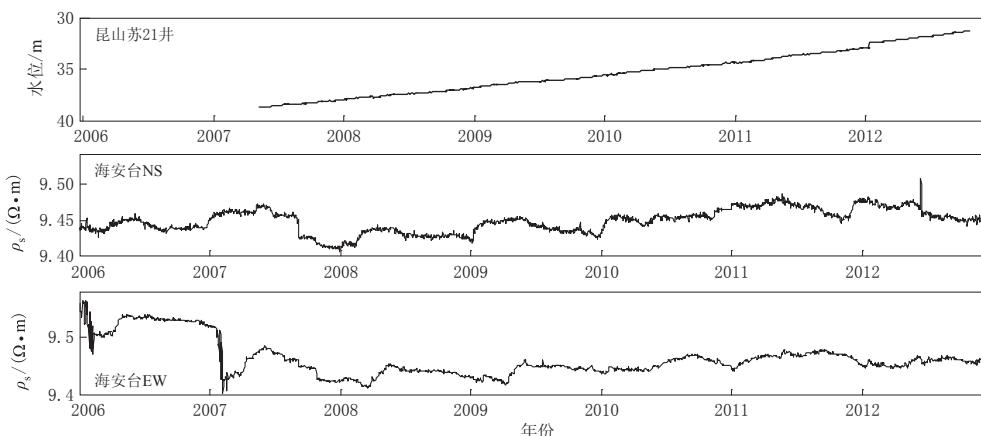


图 2 昆山苏 21 井水位和海安台北 NS 和 EW 向地电阻率日均值曲线

Fig. 2 Daily mean value curves of water level at the well Su21 (upper) and georesistivity of the station Hai'an in NS (middle) and EW (lower) directions

台站的地电阻率趋势变化与水位趋势变化完全不存在同步现象。由图 2 可见, 江苏苏南因停止地下水开采, 水位呈长期趋势上升, 但周围海安台 NS 和 EW 两个方向上地电阻率的长期变化却有升有降, 显然, 非构造水位变化并不是造成地电阻率长期趋势变化的原因。

另一种观点认为地电阻率的趋势变化与观测电极有关(刘昌谋等, 1988)。事实上, 在长期观测中, 由于采用正反向供电电极基本无腐蚀现象(电子的双向运动), 因此很少有电极老化的问题, 与观测电极有关的观点从观测原理上也不足以解释。目前地电阻率仪器的输入阻抗范围非常大, 电极阻抗的变化完全在观测要求之内, 并且实际观测中地电阻率趋势变化有上升有下降, 而假设的观测电极腐蚀问题只可能朝一个方向变化。同理, 也很容易排除地电阻率趋势变化与温度、气压、降雨等有关。

下面分别从地电阻率与应变的关系、地电阻率固体潮现象、地电阻率趋势变化与周围形变观测结果对比等方面来揭示地电阻率长趋势变化的机理。

2.1 地电阻率与应变的关系

杜学彬等(2007)应用各向异性介质近似震源区及附近的介质, 参考克拉耶夫(1954)提出了垂直最大加载方向的电阻率变化 $\Delta\rho_{s\perp}/\rho_{s\perp}$ 和平行最大加载方向的电阻率变化 $\Delta\rho_{s//}/\rho_{s//}$, 二者的表达式分别为

$$\frac{\Delta\rho_{s\perp}}{\rho_{s\perp}} = \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_f/v + \rho_0} \frac{\Delta v}{v}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\rho_{s//}}{\rho_{s//}} = \frac{\rho_f - \rho_0}{2} \left(\frac{1}{\rho_f/v + \rho_0} + \frac{1}{\rho_0/v + \rho_f} \right) \frac{\Delta v}{v}, \quad (2)$$

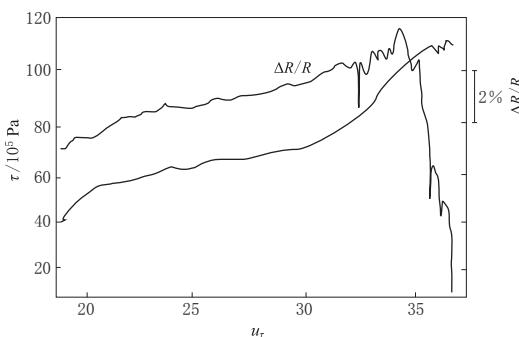


图 3 剪切应力的线性加载下岩石电阻率变化
(引自国家地震局科技监测司, 1995)

图中 u_τ 为剪切位移, τ 为剪切应力

Fig. 3 Variation of rock resistivity under linear loading of shearing stress (after Department of Science and Technology Monitoring, State Seismological Bureau, 1975)
 u_τ is shearing displacement, and τ is shearing stress

式中, ρ_f 为饱水裂隙电阻率, ρ_0 为骨架电阻率, 一般 $\rho_0 \gg \rho_f$, v 为孔隙率。根据式(1)和(2)可知: 当主应力张性变化时, $\Delta\rho_{s\perp}/\rho_{s\perp}$ 和 $\Delta\rho_{s//}/\rho_{s//}$ 呈趋势下降; 主应力压性变化时, $\Delta\rho_{s\perp}/\rho_{s\perp}$ 和 $\Delta\rho_{s//}/\rho_{s//}$ 呈趋势上升; 无论上升和下降, 垂直加载方向的电阻率变化一般均大于平行加载方向的电阻率变化。因此, 某方向的地电阻率变化与周围应力场的变化存在密切关系, 而且在一定形变范围内, 可以认为形变与地电阻率之间存在近线性关系, 在实验室里也有类似结果。图 3 给出了各种正应力加载下剪切应力与岩石电阻率的关系(国家地震局科技监测司, 1995), 可见在剪切应力的线性加载下, 岩石电阻率初期基本呈近线性的上升变化, 只有在接近破裂的情况下岩石电阻率才出现波动, 之后岩石破裂后电阻率大幅下降。这样看来, 电阻率岩石破裂实验的两个变化过程与实际观测中地电阻率的两种异常变化是比较一致的。一种是地电阻率的长期趋势变化, 反映的是应力加载和释放过程中岩石电阻率的趋势变化, 与式(1)和(2)一致; 另一种是震前震源附近的地电阻率大幅破年变变化, 反映了应力加载过程中

况下岩石电阻率才出现波动, 之后岩石破裂后电阻率大幅下降。这样看来, 电阻率岩石破裂实验的两个变化过程与实际观测中地电阻率的两种异常变化是比较一致的。一种是地电阻率的长期趋势变化, 反映的是应力加载和释放过程中岩石电阻率的趋势变化, 与式(1)和(2)一致; 另一种是震前震源附近的地电阻率大幅破年变变化, 反映了应力加载过程中

震前岩石的破裂过程.

2.2 地电阻率的固体潮现象

上述分析表明, 地电阻率的变化与周围应变存在一定关系. 在实际观测中, 检验观测物理量与应变关系最直接的现象即为固体潮现象. 赵玉林等(1990)给出地电阻率的相对变化与形变相对变化的比值系数为

$$K = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\frac{\Delta V}{V}}, \quad (3)$$

式中 ρ 为电阻率, V 为应变, K 为比值系数. 对于不同种类的岩石, K 值相差很大. 根据赵玉林等(1990)的实验研究, 覆盖层的 K 值仅为 $10-10^2$, 而不同种类的岩石可达 10^3-10^5 . 一般固体潮应变量级为 10^{-7} , 假设部分岩石的 K 值能达到 10^4 , 那么实际上因固体潮引起的岩石电阻率变化则可达 10^{-2} , 因此在观测精度比较高的情况下, 地电阻率观测有可能观测到固体潮现象. 然而, 在实际观测中, 要同时满足上述 K 值的岩石条件和电阻率测量精度, 显然是非常困难的, 因此绝大部分地电阻率观测场地是无法分辨固体潮的, 尤其是覆盖层观测场地, 即使场地噪声再小也很难观测到固体潮现象, 仅在场地噪声小且供电信号强的高精度观测情况下方能观测到固体潮现象. 图 4 给出了南京台 2005 年 5 月的地电阻率整点值曲线, 可见存在明显的日周期变化. 经仔细核查排除周期变化与降雨、气压、温度等有关外, 观测场地内也不存在金属管线、施工、水流等干扰因素, 并且大潮时日变比较明显, 小潮时日变不清晰, 经分析认定为地电阻率的固体潮现象. 进一步给出当年 5 月 6—12 日地电阻率观测值和理论固体潮(图 5), 图中显示固体潮加载时 NS 和 EW 两个方向的地电阻率曲线均呈上升趋势, 固体潮卸载时地电阻率曲线均呈下降趋势. 以 EW 测向为例, 地电阻率的日变幅值约为 $0.17 \Omega \cdot m$, 固体潮应变日变幅值约为 9×10^{-8} , 因此根据式(3)可以计算得到 $K=3 \times 10^4$, 与赵玉林等(1990)的结果相吻合, 这说明在一定岩性构造和较高信噪比条件下地电阻率场地是可以观测到固体潮的. 值得注意的是, 固体潮同样也会引起水位变化, 但这种水位变化是由构造所引起, 反映了岩石孔隙度的变化, 因此在构造作用下, 水位变化与地电阻率变化的机理是一致的. 上文也论及单由地电阻率变化不能简单地判断其与水位变化有关, 地下水位对地电阻率的影响更多地取决于是否为构造水位的变化(表层降雨对表层电阻率的年变影响是另外的问题, 此处不再赘述). 地电阻率的固

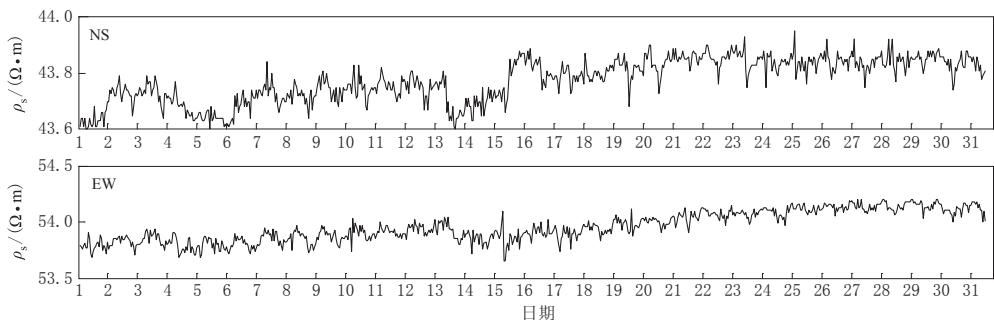


图 4 2005 年 5 月南京台 NS 和 EW 向电阻率整点值曲线

Fig. 4 The hourly-value curves of georesistivity recorded by NS and EW directions at the station Nanjing in May of 2005

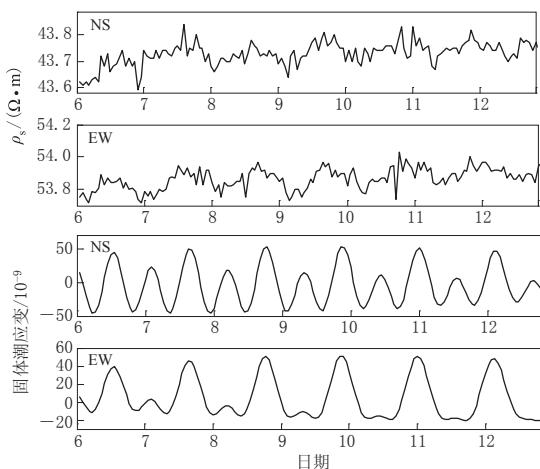


图 5 2005 年 5 月 6—12 日南京台电阻率和固体潮应变整点值理论曲线

Fig. 5 The hourly-value curves of georesistivity recorded by NS and EW directions as well as theoretical hourly-value curves of solid tide strain along NS and EW directions at the station Nanjing in May 6–12, 2006

邮台 1997—2007 年的地电阻率变化曲线，同时给出了茅山断裂带竹矿跨断层水准（江苏省唯一跨断层基岩点，垂直形变）的变化曲线，可以看到 1999 年、2003 年初和 2005 年初左右

体潮现象对理解地电阻率的观测结果非常有意义，在实际观测中，可考虑通过加大观测信号（加大供电电流、缩短供电极距等）来观测应变与地电阻率的关系。

2.3 地电阻率趋势变化与周围形变观测结果的对比

在实际观测中，由于地电阻率观测场地相对较少，每个场地又由于各种原因，其观测的连续性和可靠性也不是很好，周围形变也存在类似问题，相对比较有意义的跨断层水准也由于观测采样率低和场地本身大都不在基岩上，好的观测结果也很少有，因此探讨地电阻率趋势变化与周围形变观测的关系变得比较困难。经过认真梳理，发现地电阻率趋势变化不但具有区域上的同步性，与周围一些形变观测也存在一定的相关变化。

图 6 给出了江苏新沂台、南京台、高

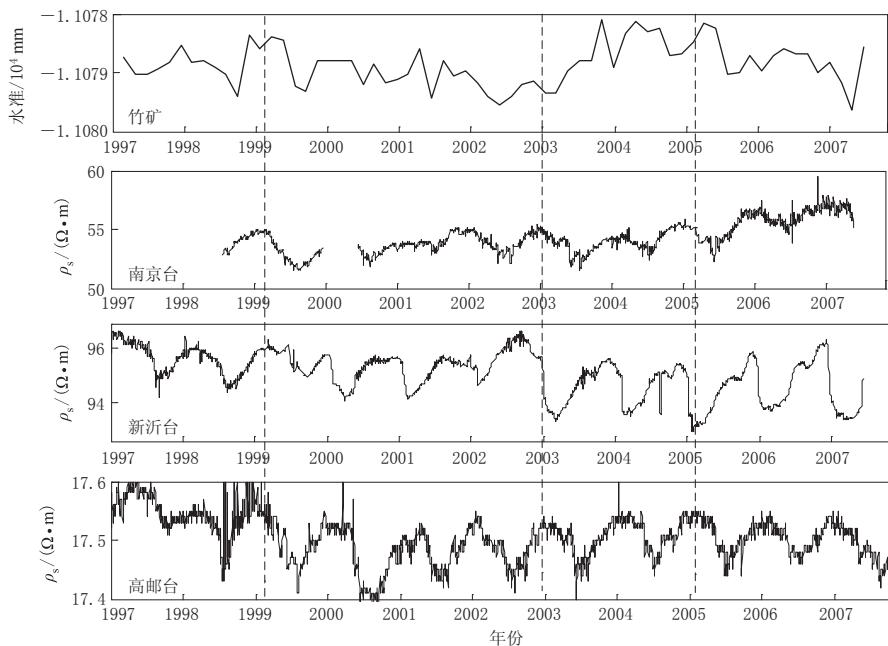


图 6 江苏新沂、南京、高邮等台站电阻率与竹矿跨断层水准观测的同步变化关系

Fig. 6 Synchronous changes of the resistivity for the stations Xinyi, Nanjing and Gaoyou and across-fault water leveling observation of Zhukuang

水准与地电阻率均存在同步的趋势变化转折现象, 进一步说明地电阻率的趋势变化具有较大范围的同步性, 并与周围应力场的变化有关。另外, 值得注意的是, 趋势变化的转折有同步性, 但对于每个场地而言, 其转折前后的趋势变化方向并不一定一致, 也反映了大范围地区的背景应力场方向可能比较一致, 但在附近构造作用下应力场的变化存在局部性, 这一点对于具体地震的预测可能具有重要意义。

综上所述, 从理论上、实验上、实际观测中均可找到地电阻率与周围应变的关系, 地电阻率趋势变化可能更多地反映了区域应力场的变化, 而且区域应力场的变化并不意味着地震的发生。

3 地电阻率趋势变化的预测意义

3.1 江苏高邮—宝应 $M_s 4.9$ 地震

2012年7月20日江苏高邮—宝应 $M_s 4.9$ 地震的震中位于(33.05°N, 119.57°E), 震源机制解(孙业君等, 2012)显示该地震以右旋走滑为主, 且带有少量的正断层分量。该地震是江苏省22年来陆地上发生的最大地震, 因此虽然该地震的震级不高, 但在东部弱震区仍然算是一次非常显著的地震。江苏省一共有5个地电阻率观测场地(图7), 高邮—宝应地震发生在江苏省中部地区, 因此5个场地震前的电阻率变化为我们提供了宝贵的资料。图8给出了高邮台地电阻率2010年以来经傅里叶滑动去年变后所得到的观测数据曲线, 可以清楚地看到, 从2010年开始3个测向均呈趋势上升, 表征高邮台附近地区震前均出现了应力集中, 直到地震发生应力得到释放后, 3个测向的电阻率才开始呈趋势下降。另外, 震前震后地电阻率的趋势变化同步现象在高邮台的观测历史上从未出现过, 甚至在江苏省其它地电阻率场地也未出现过如此一致的变化现象。其它4个地电观测场地地震前的电阻率变化曲线如图9所示, 可见震前1年4个场地NS测向的电阻率均呈趋势下降, EW向除南京台基本持平外, 另外3个台站也呈下降趋势, 这表明周围的应力场变化均为张性变化。地电阻率趋势变化充分显示了震前应力是由西侧和南侧向高邮地区集中, 在趋势发生转折后发生了地震; 地震发生后, 高邮台地电阻率一直趋势向下, 显示了应力的释放过程。

3.2 汶川 $M_s 8.0$ 地震

2008年5月12日汶川 $M_s 8.0$ 地震发生在南北地震带龙门山断裂带, 震中位于(31.02°N, 103.37°E), 震源机制解(徐锡伟等, 2008)显示该地震以逆冲为主、具有一定右旋走滑分量。龙门山断裂带在受西北向巴颜喀拉活动地块挤压的长期过程中, 不断重复应力积累、地震发生的过程, 这一点在成都台的地电阻率观测结果上也有很好的体现。成都台位于汶川地震震中东南方向, 震中距约为69 km。图10给出了成都台地电阻率NE测道

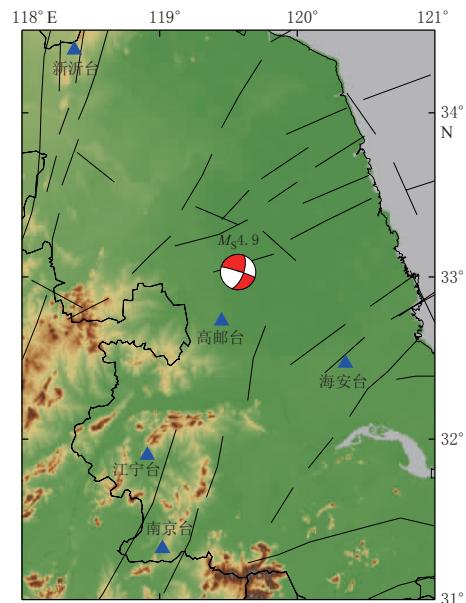


图7 2012年高邮—宝应 $M_s 4.9$ 地震和地电阻率观测场地分布

Fig. 7 Epicentral location of Gaoyou-Baoying $M_s 4.9$ earthquake in 2012 and distribution of georesistivity observation stations

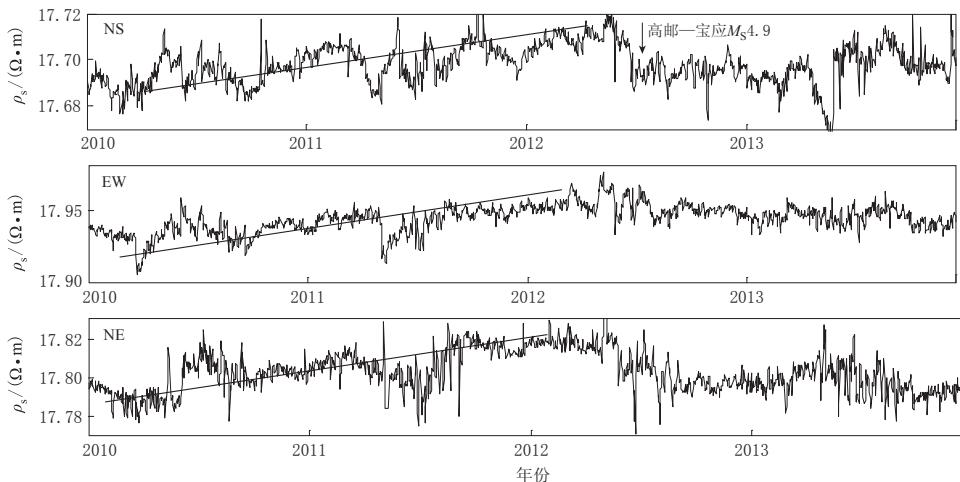


图 8 高邮台 2010—2013 年地电阻率去年变周期曲线

Fig. 8 Georesistivity variation curves after removing the annual variation in three directions at the station Gaoyou in 2010–2013

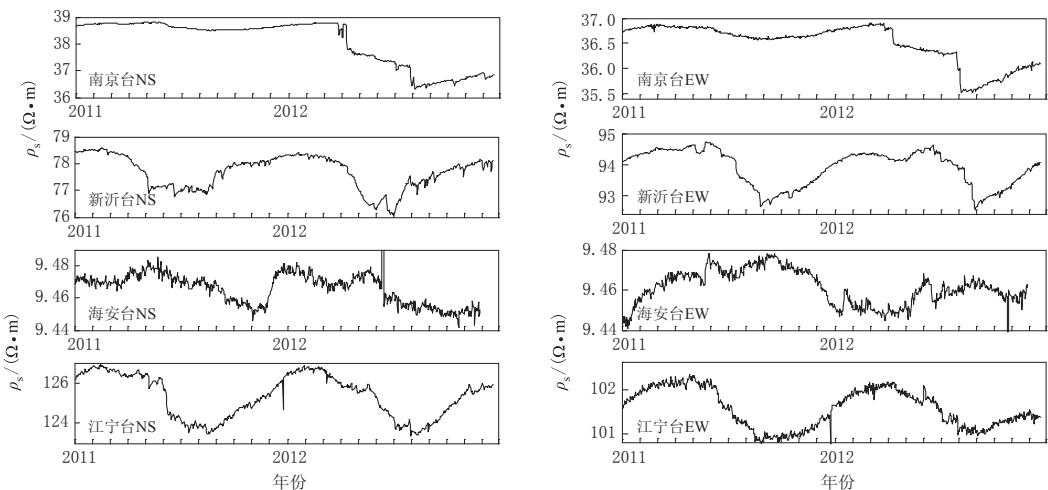


图 9 2011—2012 年江苏省南京、新沂、海安、江宁台 NS 和 EW 向地电阻率日均值曲线

Fig. 9 Daily mean value curves of georesistivity at the stations Nanjing, Xinyi, Hai'an and Jiangning in NS and EW directions in 2011–2012

的观测结果，可见地电阻率的长期变化均呈趋势上升，显示出龙门山断裂带附近长期应力积累的过程，而周围 200 km 范围内的地震均发生在趋势转折位置，汶川 $M_s 8.0$ 地震更是发生在转折后，而且是在出现了地电阻率大幅度破年变的情况下发生的，与图 3 所示的实验结果非常一致。

以上两个震例均显示：地电阻率趋势上升期大于 3 年，则表明该地区处于应力增强阶段；当地电阻率值上升至高值阶段出现转折时，周围发生显著地震，则表明该地区经历应力积累，到一定程度后处于应力释放阶段。本文通过对全国地电场地电阻率变化规律进行梳理的结果显示，地电阻率趋势上升至阶段高点转折后，在该台站周围不一定发生 $M_5.0$

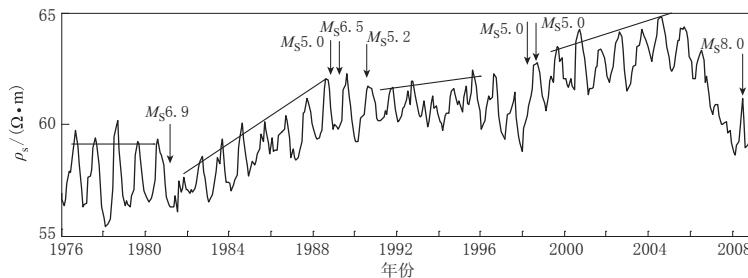


图 10 成都台 1976—2008 年地电阻率 NE 向月均值曲线

Fig. 10 Monthly mean value curve of georesistivity in NE direction at the station Chengdu during 1976—2008

以上地震，但其附近容易发生 $M_{3.0}$ — 4.0 显著地震，例如山西太原台、安徽合肥台等均出现过类似现象，但也存在无地震对应的情况；然而，在地电阻率趋势下降（非破年变下降）达到阶段低点后出现转折的情况下，与周围地震对应的现象则较少。这些现象反映了台站周围应力场变化是否有利触发地震，与台站周围的构造性质有关，因此只有根据该地区的断层性质综合分析周围地电趋势变化的方向才能有效地判定该地区的潜在地震危险性。

新沂、蒙城、郯城这几个大范围内的地电阻率观测场地均出现的地电阻率转折时间接近的同步趋势变化现象（图 1），反映了区域应力场的相对变化在几年以后可能发生转向，这种同步转向现象显然不是偶然的，而是由其背后存在的地球动力学因素所致。图 1 显示大约在 2005 年和 2011 年有较大范围内的趋势变化现象，这两个年份前分别发生了 2004 年 12 月 28 日印尼 $M_s 9.0$ 地震和 2011 年 3 月 11 日日本 $M_s 9.0$ 地震。杜学彬（2010）指出这种长趋势变化可能与地球自转或板块运动有关，与远距离的巨震也可能存在一定的相关性。

4 讨论与结论

在实际观测中，地电阻率一般存在年变化，因表层电阻率的影响作用，年变化可能规则，也可能不太规则，部分场地也会受到短期降雨等影响，这些变化可以理解为与场地有关的正常变化。地电阻率的异常变化在长期观测中主要包括破年变变化和保留年变形态的一年以上趋势变化这两类。趋势变化更多地反映了周围应力场的变化，破年变变化则体现了周围岩石破裂的过程，这两类异常与实验室的岩石破裂实验结果也比较一致，对未来地震预测均有重要的作用。但是，两类异常所反映的异常性质不一样，预测的意义也完全不同。根据地震断层的破裂长度 L 可通过（郭增建，秦保燕，1979）

$$\lg L = \frac{M - 2.56}{2.97} \quad (4)$$

来估算。

对于一个 $M_{5.0}$ 地震而言，破裂长度不到 7 km，假设震源范围扩大 3 倍，也仅有 20 km 左右，很难保证观测场地就在震源附近，因此，一般只有 $M_{6.0}$ 以上地震前才有比较明确的破年变下降异常，例如汶川地震（图 10）。对于中强震以下的地震则很难观测到与震源破裂直接相关的异常，往往只能给出周围应力场的变化，因此趋势异常的阶段性要特别注意。在实际观测中，表现为趋势异常的可被大量观测到，破年变异常则很少被观测到。地

电阻率的趋势变化反映了周围区域应力场的变化，因此与地震很难存在一一对应的关系，需要结合周围构造性质和历史震例来判断该区域内的危险性。

水位对地电阻率的影响比较复杂，不能简单地理解为水位上升地电阻率一定下降。一般来说，水位对地电阻率的影响有两类。一类是降雨灌溉等直接作用或渗透作用（一般几十米以上）造成表层电阻率的大幅变化从而引起整体电阻率的变化，在实际观测中表现为年变或短期扰动变化，更深的非构造引起的水位变化因为裂隙没有大的变化一般不会对地电阻率产生明显的影响，例如，在江苏海安台深埋电极（34 m），通过1年4次的电极接地电阻测量，发现全年接地电阻并无明显变化，从海安台的接地电阻（表1）可见接地电阻无明显的季节性影响。另一类是构造水位的变化，所反映的是构造变化，与地电阻率的变化直接相关。一般在地电阻率趋势上升区域，其构造水位的变化也是趋势上升的，与降雨所造成的表层电阻率下降相反，这一类变化也是我们需要关注的。根据式（1），地电阻率长期趋势变化的物理意义在于岩石孔隙率的变化，因此与构造引起的水位变化有相似的结果，研究区域构造水位变化可以进一步确认地电阻率长期趋势变化的性质。因此，结合水位与其它前兆观测，可以很好地理解地电阻率的趋势变化，也更加深刻地认识到真正与前兆相关的异常变化是由构造改变所致。

表1 海安台EW向供电电极接地电阻

Table 1 The ground resistance of the power supply electrodes in EW direction at the station Hai'an

年份	2月接地电阻/Ω	5月接地电阻/Ω	8月接地电阻/Ω	11月接地电阻/Ω
2011	6.91	7.00	7.68	6.80
2012	7.15	6.81	7.62	7.78
2013	7.32	7.58	7.72	7.90
2014	6.91	7.02	7.16	6.73
2015	7.01	7.22	7.53	7.29

地电阻率的长期观测结果为研究区域应力场的相对变化提供了可能，在实际观测中，从大部分测点上可以明显地看出趋势变化方向，但要保证观测到可靠的趋势变化，有必要解决表层干扰（降雨等）和环境噪声等问题，建议观测系统均应采用适当的平行深埋电极观测。文中所讨论的地电阻率固体潮现象在实际观测中很少被观测到，主要也是环境噪声所致，可以通过缩短供电电极距和加大供电电流等办法来大幅提高信噪比，从而进一步研究地电阻率的固体潮现象，以确定地电阻率与应变的关系。

中国地震局兰州地震研究所杜学彬研究员对本文提出了建议和意见，作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 杜学彬. 2010. 在地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学：地球科学, **40**(10): 1321–1330.
- Du X B. 2010. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction[J]. *Science China Earth Sciences*, **54**(1): 145–156.
- 杜学彬, 李宁, 叶青, 马占虎, 闫睿. 2007. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因[J]. 地球物理学报, **50**(6): 1802–1810.
- Du X B, Li N, Ye Q, Ma Z H, Yan R. 2007. A possible reason for the anisotropic changes in apparent resistivity near

- the focal region of strong earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **50**(6): 1802–1810 (in Chinese).
- 国家地震局科技监测司. 1995. 地震电磁观测技术[M]. 北京: 地震出版社: 22–23.
- Department of Science and Technology Monitoring, State Seismological Bureau. 1995. *Seismic Electromagnetic Observation Technology*[M]. Beijing: Seismological Press: 22–23 (in Chinese).
- 郭增建, 秦保燕. 2000. 某些震源问题的讨论[J]. 地震, **20**(1): 103–109.
- Guo Z J, Qin B Y. 2000. Discussion on some problems of earthquake source[J]. *Earthquake*, **20**(1): 103–109 (in Chinese).
- 克拉耶夫. 1954. 地电原理(上册)[M]. 北京: 地质出版社: 25–62.
- Kraev A P. 1954. *Geoelectrics Principle (Volume One)*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 25–62 (in Chinese).
- 刘昌谋, 关华平, 秦乃岗, 黄道立. 1988. 地电阻率的长期变化[G]//地震监测与预报方法清理成果汇编: 地磁、地电分册. 北京: 地震出版社: 197–199.
- Liu C M, Guan H P, Qin N G, Huang D L. 1988. Long-trend variation of geo-resistivity[G]//*Compilation of Achievements in Earthquake Monitoring and Prediction: Geomagnetic Geoelectric Survey*. Beijing: Seismological Press: 197–199 (in Chinese).
- 陆阳泉, 温新民. 1980. 三向压缩下大型混凝土标本的电性特征[J]. 西北地震学报, **2**(4): 55–60.
- Lu Y Q, Wen X M. 1980. The electric characterization of great beton sample under three course compression[J]. *North-western Seismological Journal*, **2**(4): 55–60 (in Chinese).
- 钱复业, 赵玉林, 刘婕, 黄燕妮. 1990. 唐山 7.8 级地震地电阻率临震功率谱异常[J]. 地震, (3): 33–39.
- Qian F Y, Zhao Y L, Liu J, Huang Y N. 1990. Power spectrum anomaly of earth resistivity immediately before Tangshan earthquake $M_{\text{7.8}}$ [J]. *Earthquake*, (3): 33–39 (in Chinese).
- 钱家栋, 马钦忠, 李劭铭. 2013. 汶川 $M_{\text{8.0}}$ 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究[J]. 地震学报, **35**(1): 4–17.
- Qian J D, Ma Q Z, Li S N. 2013. Further study on the anomalies in apparent resistivity in the NE configuration at Chengdu station associated with Wenchuan $M_{\text{8.0}}$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **35**(1): 4–17 (in Chinese).
- 孙业君, 王俊, 黄耘. 2012. 2012 年 7 月 20 日江苏省高邮—宝应 $M_{\text{4.9}}$ 地震震源机制解[J]. 防震减灾工程学报, **32**(4): 521–522.
- Sun Y J, Wang J, Huang Y. 2012. Focal mechanism of Gaoyou-Baoying $M_{\text{4.9}}$ earthquake on 20 July, 2012[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, **32**(4): 521–522 (in Chinese).
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川 $M_{\text{8.0}}$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, **30**(3): 597–629.
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, Ma B Q, Chen J, Zhou R J, He H L, Tian Q J, He Y L, Wang Z C, Sun Z M, Feng X J, Yu G H, Chen L C, Chen G H, Yu S E, Ran Y K, Li X G, Li C X, An Y F. 2008. The $M_{\text{8.0}}$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure[J]. *Seismology and Geology*, **30**(3): 597–629 (in Chinese).
- 张国苓, 乔子云, 贾立峰, 尹小兵, 张波. 2013. 隆尧地电阻率与地下水位关系分析[J]. 地震地磁观测与研究, **34**(5): 141–143.
- Zhang G L, Qiao Z Y, Jia L F, Yin X B, Zhang B. 2013. The study of relationship between earth resistivity and ground water level at Longyao seismic station[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **34**(5): 141–143 (in Chinese).
- 郑文俊, 钱家栋, 田山, 刘允秀. 2007. 宝坻台地电观测的水文地质背景及其电阻率变化与降雨量和水位变化的关系[J]. 地震, **27**(2): 81–88.
- Zheng W J, Qian J D, Tian S, Liu Y X. 2007. Study on geohydrologic setting of the observation of resistivity on Baodi station and relation between the variations of resistivity with rainfall and water level fluctuation[J]. *Earthquake*, **27**(2): 81–88 (in Chinese).
- 赵玉林, 钱复业, 许同春. 1990. 岩土层受力时电阻率变化与应变的关系[J]. 地震学报, **12**(1): 87–93.
- Zhao Y L, Qian F Y, Xu T C. 1990. The relationship between resistivity variation and strain in a load-bearing rock-soil layer[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **12**(1): 87–93 (in Chinese).