

王燚坤, 何康, 李军辉, 等. 合肥台地电阻率 NS 向趋势异常变化原因分析[J]. 华南地震, 2019, 39(2): 58–64. [WANG Yikun, HE Kang, LI Junhui, et al. Cause Analysis on Abnormal Change of Ground Resistivity in NS Trend at Hefei Station[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2): 58–64]

合肥台地电阻率 NS 向趋势异常变化原因分析

王燚坤¹, 何 康², 李军辉², 葛计划¹, 陶 媛¹

(1. 合肥地震台, 合肥 34001; 2. 安徽省地震局, 合肥 34001)

摘要: 合肥台 NS 测向地电阻率自 2015 年以来出现趋势下降异常, 经核实 2015—2016 年降雨量增多和地下水位抬升与地电阻率趋势下降异常变化显著相关。通过褶积滤波法和相关分析法分别消除降雨和水位影响后, 趋势下降变化不明显, 从而认为此变化为干扰所致, 非地震前兆异常, 并探讨了这种干扰影响机制, 为今后判断引起地电测值变化的原因提供了科学依据。

关键词: 地电阻率; 趋势异常; 降雨、地下水位变化; 褶积滤波

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2019)02-0058-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2019.02.009

Cause Analysis on Abnormal Change of Ground Resistivity in NS Trend at Hefei Station

WANG Yikun¹, HE Kang², LI Junhui², GE Jihua¹, TAO Yuan¹

(1. Hefei Seismic Station, Hefei 230031, China; 2. Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China)

Abstract: Ground resistivity in NS trend at Hefei station has been declining anomalously since 2015. It is verified that the increase of rainfall and the rise of groundwater level are significantly correlated with the anomalous change of ground resistivity trend from 2015 to 2016. By using convolution filtering method and correlation analysis to eliminate the effect of rainfall and water level separately, the downward trend is almost unaffected. Therefore, it is considered that the change is caused by interference and is not an earthquake precursor anomaly. And the interference impact mechanism is discussed in purpose of providing a scientific basis for judging the causes of changes in geoelectric measurements in the future.

Keywords: Ground resistivity; Anomalous trend; Rainfall and groundwater level changes; Convolution filtering

收稿日期: 2017-12-27

基金项目: 中国地震局三结合课题“安徽省地电阻率年变化影响因素分析及其差异性探讨”(161201)资助

作者简介: 王燚坤(1984-), 女, 工程师, 主要从事地震电磁观测与研究工作。

E-mail: kun_0768@126.com.

0 引言

我国自 1966 年邢台地震后开展地电阻率观测以来,已经形成了由近百个定点连续观测台站组成的地电阻率观测网,并且在一些中、强地震前记录到了显著的中短期异常^[1-3],从而使该项前兆观测结果成为震情判断的重要依据。由于对地震的孕育和发生过程以及震中区台站的地壳结构和介质条件、应力过程等了解甚少,加之目前固定地电阻率台站的探测深度范围不大,且影响观测的外界干扰不能完全排除,造成观测数据有多重复杂性。在长期的观测中发现,受季节、降雨、地下水位、观测环境及观测系统等因素影响,地电阻率往往由趋势变化、年变化、阶变化等变化形态叠加在一起,组成相对复杂的曲线形态^[4-5],给异常判定带来诸多困难。因此在地电阻率资料的应用和研究中,当地电阻率出现异常变化时,首先要进行影响因素确认。本文基于合肥台地电阻率 NS 向趋势性下降异常变化,结合观测系统检测、环境调查结果,应用褶积滤波法和线性回归法分别分析了降雨和地下水位对地电阻率的影响,以此探讨了地电阻率异常变化的成因。尽可能揭示地电阻率的真实变化,对地震前兆异常判定有一定的现实指导意义。

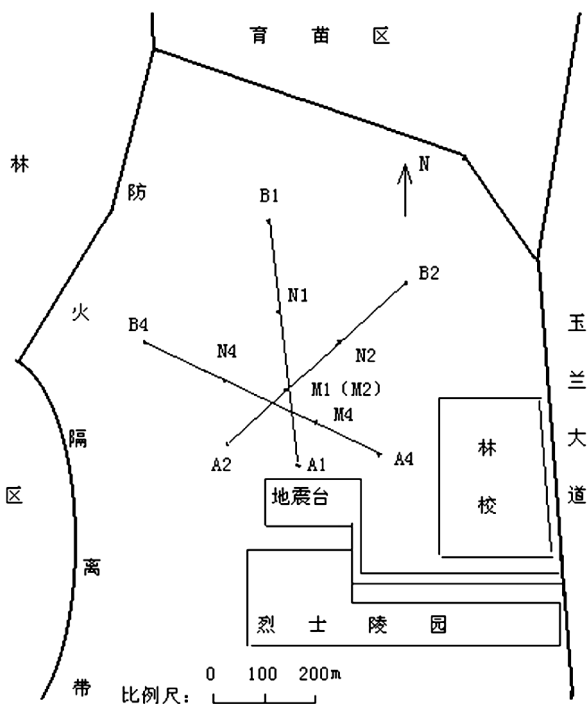


图 1 合肥台地电阻率观测布极示意图
Fig.1 Pole distribution of earth resistivity observation at Hefei seismic station

1 台站基本概况

合肥地震台位于合肥市西郊大蜀山(死火山口)东麓森林公园内,当地属于淮阴地槽东端的丘陵地带,覆盖层较薄,基岩岩性为火山成岩、辉绿岩侵入白垩系红砂岩。台站地处华北断块区南缘,距庐北北东向深大断裂西侧 33 km 处,区域断裂构造比较发育,有史记载以来近场区发生过多次破坏性地震。

地电阻率观测始于 1972 年 6 月,地电布极区为存在高差的丘陵地貌,无深大沟壑及积水区,无农业种植及农田灌溉,树林、竹林等植被密集覆盖,观测条件较为稳定。采用对称四极装置观测,布设 NS、NE、NW 三个测道,供电电极距均为 600 m,测量极距均为 200 m;供电、测量电极为 1×1 m 铅板,埋深约 1.8 m,外线路采用塑料皮铜质独芯线,以水泥线杆架空;目前使用 ZD8BI 数字地电仪观测。2003 年在合肥台地电布极区内进行电测深勘选测量,依据该台测区电测深数据反演水平地层电性结构如表 1 所示,电测深曲线类型为 HA 型,地下电性结构为七层^⑥,介质电阻率低。NS、NE 测向两个方向的地下介质电阻率分层相近,说明该台地下介质横向均匀程度高。

表 1 合肥台电测深曲线反演的电性结构
Table 1 Electrical structure of inversion of electrical sounding curve at Hefei station

分层	NS		NE	
	$\rho/\Omega\cdot m$	h/m	$\rho/\Omega\cdot m$	h/m
1	8.40	3.75	10.84	2.66
2	10.70	8.00	13.96	12.46
3	6.35	21.80	8.99	27.08
4	16.50	45.30	14.43	59.69
5	6.50	104.40	8.77	108.86
6	8.65	136.70	10.86	141.48
7	17.00		21.55	

2 异常变化特征

合肥台地电阻率年变周期不是很规则,大致呈“冬高夏低”的年变化形态,3 月开始逐渐下降,7~8 月为低值,9~12 月逐渐回升,于次年 1~2 月达到高值。2015 至 2016 年 NS 向地电阻率呈现趋势性下降异常,2015 年 12 月至 2016 年 2 月年

变高值未达到往年水平，低于 2014 年同期数值约 0.6%~0.7%，值得关注的是 2015 年 11 月地电阻率反而下降、12 月年变上升幅度也显著减小，存在年变化畸变。2016 年该方向地电阻率年变化恢复至正常，但整体变化范围明显低于 2013—2015 年同期数值。

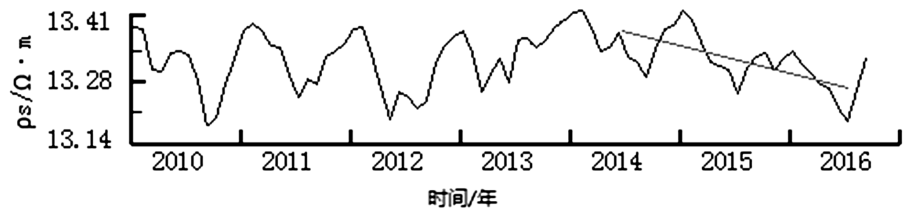


图 2 合肥台 NS 向地电阻率月均值曲线
Fig.2 Monthly mean curve of ground resistivity at Hefei station in NS trend

3 观测系统与环境调查

3.1 观测系统检测

2016 年 4 月 6 日中国地震前兆台网中心、安徽省地震局、江苏省地震局电磁学科专家赴合肥台进行现场异常核实。经核实，认为观测仪器稳定、电极连接良好、外线路线杆及瓷瓶无损毁。同时测量部分电极接地电阻，各电极的接地电阻均小于 30 Ω，全部符合《地震及前兆数字观测技术规范》^[7]要求。检查外线路绝缘情况，仅有 NS 测道供电极 B1 极线路绝缘性偏低，约 5 MΩ，不符合规范要求，其他测道均合格，检查结果见表 2。

NS 向外线路位于树木密集区，偶有线路被树木砸断和树枝磨损线路现象，外线路存在破皮和接头氧化问题，2015 年 12 月、2016 年 1 月 B1 供电极处曾有两根外线路破皮裸露铜线，淋雨后线路局部漏电，造成观测数据突变，2016 年 1 月 6 日更换了破损线路，数据立即恢复了正常，2015 年 11 月年变化上升形态畸变与外线路淋雨漏电时间不吻合。但 NS 向 B1 极线路绝缘性偏低仍存在漏电隐患，恶劣天气易引起地电阻率测值不稳定变化。自更换破损线路后，降雨未导致数据突变、粗差现象，认为 B1 极线路绝缘性偏低不是引起 NS 向地电阻率趋势性下降异常的原因。

表 2 合肥台供电线和测量线对地绝缘电阻、电极接地电阻测试结果

Table 2 Test results of insulation resistance to ground and grounding resistance of electrode for power supply and measuring lines of Hefei station

布设方位	供电线、测量线绝缘电阻				电极接地电阻			
	A(MΩ)	B(MΩ)	M(MΩ)	N(MΩ)	A 极(Ω)	B 极(Ω)	M 极(Ω)	N 极(Ω)
NS	600	5	400	350	5.8	6.7	4.9	5.4
NW	800	650	500	600	8.8	5.9	6.6	6.7

3.2 观测环境干扰调查

合肥台地电布极区属于森林公园保护区，观测环境比较稳定。经调查，2010 年 8 月合肥台院内环境优化改造，改建生活用房，施工处距 NS 测道、NW 测道供电极(A1、B4)分别有 50 m、300 m，施工期间地电阻率数据波动很小，且与 NS 向出现趋势性下降异常的时间不同步。2013 年 1 月合肥市建设地铁 2 号线，最近站点距离布极区和 NS 向供电电极(B1)处约 1200 m，在数据异常期间

尚未进行轨道铺设工作，认为地电阻率趋势性异常与地铁施工没有直接关系。

4 降水及地下水位影响分析

钱复业等^[8]、刘允秀等^[9]分析认为降水、地下水位是影响地面地电阻率观测的主要因素。鉴于合肥台 NW 向与 NS 向地电阻率年变化较为同步，本文采用 NS 和 NW 测道同期地电阻率观测数据与降雨量、钻孔水位作对比分析(图 3)，进一步判定

趋势异常性质和数据变化内因。降雨资料使用合肥台气象三要素降雨量数据,因该台无专用水位观测井,水位资料使用体应变钻孔水位数据。

2009年6月台站安装体积式钻孔应变仪器,井孔距离最近地电阻率电极(A1)22 m,钻孔探头底部埋深72.3 m,孔径130 mm,水深7 m。

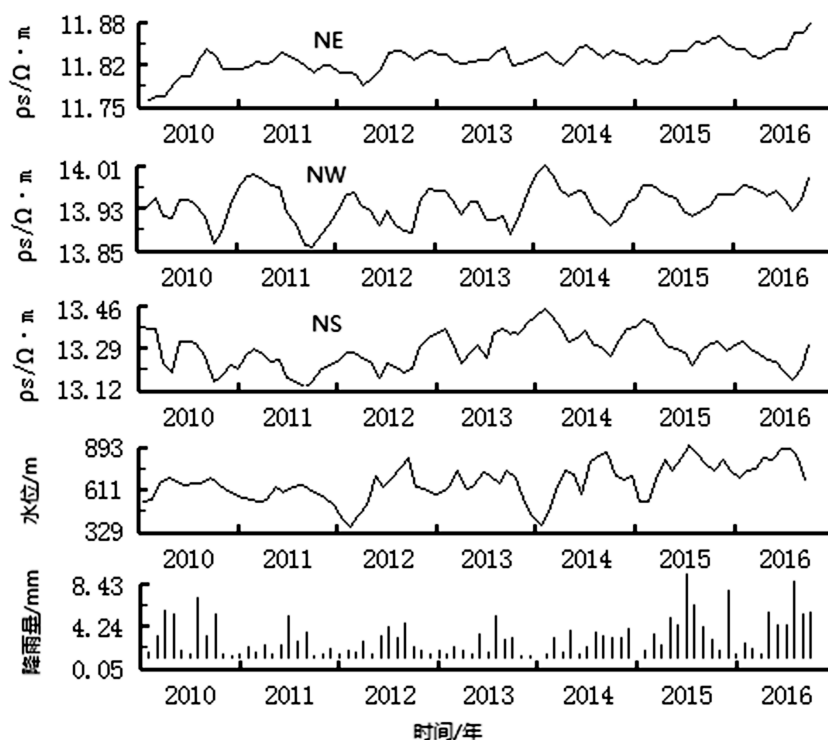


图3 合肥台地电阻率与钻孔水位、降雨量月均值对比曲线

Fig.3 Monthly means of ground resistivity, drilling water level and rainfall at Hefei station

4.1 降水干扰分析

降雨对合肥台地电阻率的影响分为两种,短时强降雨对地电阻率引起即时变化效应;连续降雨天气时地电阻率的影响表现为持续下降变化,雨后随着地面慢慢变干,测值又逐渐回升。合肥台地电阻率的年变形态和降雨分布较为一致,但极值变化滞后于降雨时间。在水量增多、降水时间延长的年份,还会影响到地电阻率的年变幅度和极值时间。

2015年11月3日至25日合肥地区出现罕见的旱季大量降水,其中4日、17日降雨量分别达到56.4 mm、57.1 mm,NS和NW测向均出现了不同程度的下降变化,之后NW向逐渐恢复至正常年变上升形态,NS向受降雨干扰影响幅度比NW向显著,11月持续下降时间较长,12月才开始回升,年底未达到往年高值,因此认为2015年11月年变化上升形态畸变与降雨因素有关。

2016年地电阻率整体变化范围明显低于

2013—2015年,值得关注的是2015—2016年降雨量比往年显著偏多,尤其是2016年年降雨量是往年的3倍,认为NS向地电阻率的趋势下降变化与降雨量有相吻合之处,因降雨对地电阻率的影响比较复杂,不仅具有即时效应,还存在一定时间滞后效应,利用褶积滤波法可以较好地去除降雨对地电阻率的影响^[10]。

根据褶积滤波法原理,即把土层看成一个系统,降雨量 $C_R(t)$ 为输入信号,降雨量对 P_s 的影响函数为 $R(t)$,地电阻率的趋势变化为

$$M(t) = B_0 + B_1 t \quad (1)$$

$$P_s(t) = M(t) + R(t) \times C_R(t) \quad (2)$$

如果将降雨的即时及滞后效应考虑进去的话,则有

$$P_s(t) = M(t) + R(t) \times C_R(t) = B_0 + B_1 t + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R(\tau) C_R(t-\tau) \quad (3)$$

如选取滞后影响时间为5个月,则

$$P_s(t) = B_0 + B_1 t + A_0 C_0 + A_1 C_1 + A_2 C_2 + A_3 C_3 + A_4 C_4 + A_5 C_5 \quad (4)$$

张学民等^[10]曾利用该方法对地电阻率进行降

雨校正,结果比一般回归效果要好。通过 Matlab 软件对 2008—2016 年合肥台降雨量对 NS 向地电阻率的影响值进行多元回归计算,其结果如图 4 所示,

从图可以看出 2015—2016 年受雨量增多地电阻率影响量值也显著增大,消除降水影响后地电阻率相对稳定一些,地电阻率趋势下降变化不显著。

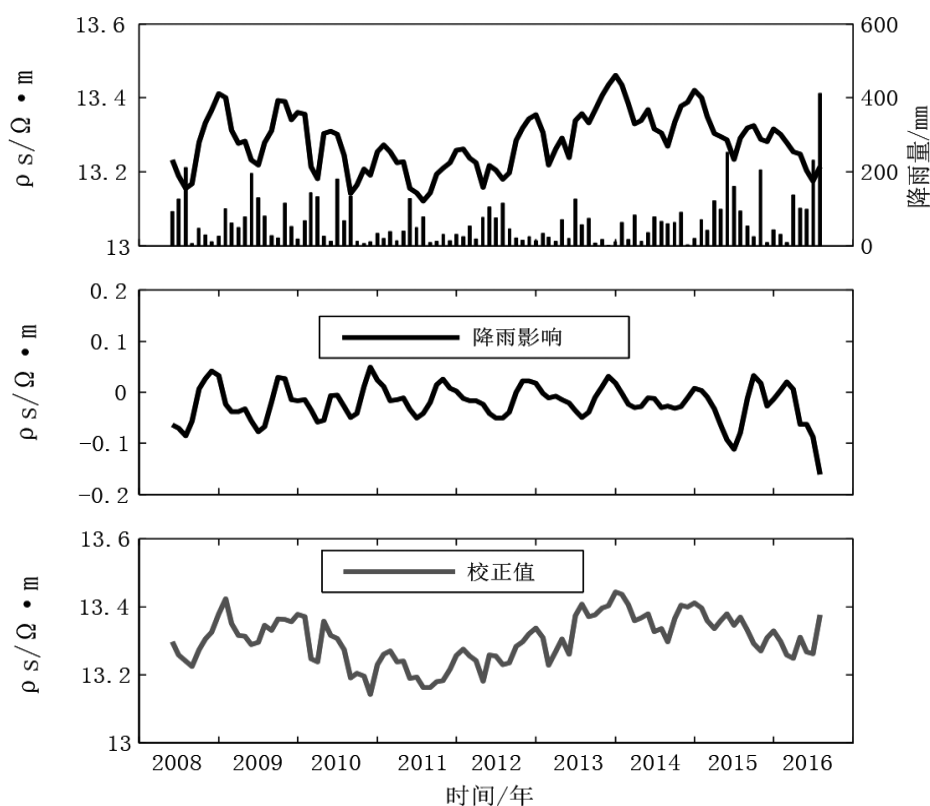


图 4 降雨对 NS 向地电阻率观测值的长趋势影响值及校正后地电阻率曲线

Fig.4 Long trend impact value of rainfall on NS ground resistivity observation and corrected ground resistivity curve

4.2 水位干扰分析

钻孔体应变及水位辅助观测点位于合肥台院内观测平台,其井孔距离地电阻率 NS 向电极(A1)约 22 m、NE 向电极(A2)约 175 m、NW 向电极(A4)约 227 m。院内观测平台有沙层应变井、测震井、电磁波井,2010 年 5 月至 2011 年 8 月合肥台观测平台相继增上深井测震和深井电磁波观测项目,距离钻孔体应变观测点分别约 10 m、6 m。施工期间钻井与安装套管操作中,分别对测震井和电磁波井下注水、抽水,对钻孔体应变和钻孔水位造成了严重干扰,此时间段内钻孔水位年变化周期不显著,整体幅度较小,2012 年钻孔水位恢复正常年变。从图 3 也可以看出,自 2012 年以来 NS、NW 向地电阻率年变化形态与钻孔水位呈反向变化,两者一致性较好,在雨季时段地下水位上升,地电阻率在低值波动,旱季时地下水位逐渐下降,地电阻率上升。例如 2013 年 9 月至

2014 年 1 月降雨量较往年偏少,水位下降较快,导致 NS、NW 方向地电阻率上升幅度增大。2015 年 11 月强降雨量,水位得到了补给开始上升,同期地电阻率下降,12 月雨水少地下水位降低,地电阻率回升,年底未达到往年同期高值,因此认为 2015 年 11 月年变化上升形态畸变与水位因素更加密切相关,地电阻率每年的年变化形态、幅度的差异应该由地下水位导致的。从趋势性变化看,2015~2016 年降雨量显著增多,水位抬升呈现趋势性上升变化,同期 NS 向趋势性下降变化凸显,NW 向趋势性上升但幅度没有 NS 向显著。

通过对合肥台 2012—2016 年地电阻率日均值数据与地下水位进行相关分析,由表 3 看出 NS 向地电阻率与水位相关性呈逐年增大趋势,经统计同时段年降雨量情况(表 4),认为这主要是由雨量逐年增加所致。尤其是 2015、2016 年的年降雨总量是往年 2、3 倍,NS 向相关性均达到 0.9 以上,表明地电阻率趋势性下降与地下水位变化密切相

关。NW 向地电阻率与水位相关性相对稳定一些, 2015—2016 年也逐年增大。NE 向与水位相关性很差, 2012 年为正相关, 2013 年开始为负相关并呈逐年下降趋势。从图 3 可看出, NE 向年变化形态不规律, 受降雨、水位影响不明显, 与 NS 向、NW 向变化不同步, 这可能与地形差异、地下电性介质各异有关, 合肥台地电阻率布极区南高北低, 西高东低, NE 向年变幅度明显低于 NS、NW 向。从 2013 年开始 NE 向年变化幅度较往年降低 30%, 在 0.4% 以下波动, 数据变化过于平稳, 2013 年经中国地震台网中心卢军研究员现场核实 NE 向异常变化, 认为可能是测区内存在未知环境干扰改变了地下电性介质引起 NE 向年变畸变, 产生这种变化的原因还有待探讨。

表 3 合肥台地电阻率与地下水位相关性分析
Table 3 Correlation between earth resistivity and groundwater level at Hefei Station

年份	NS 向	NE 向	NW 向
2012	-0.516	0.600	-0.722
2013	-0.682	-0.270	-0.853
2014	-0.889	-0.014	-0.836
2015	-0.916	-0.110	-0.879
2016	-0.933	-0.006	-0.895

表 4 合肥台 2010—2012 年年降雨总量
Table 4 Total rainfall at Hefei station during 2010 and 2012

年份	降雨/(mm)
2010	820.7
2011	296.4
2012	421.7
2013	455.4
2014	580.1
2015	1157.9
2016	1505.7

张国苓等^[11]通过线性回归方法有效排除地下水位干扰, 鉴于合肥台 NS 向地电阻率与水位相关性较高, 采用一元线性回归分析方法对水位进行定量消除, 利用水位、NS 向地电阻率日均值参量拟合出地电阻率值, 然后计算出实测观测值与拟合值的差值, 以得到消除水位影响后的校正值, 从图可以看出: NS 向地电阻率消除水位影响后年变化幅度明显减小, 2015—2016 年趋势性下降异常

变化不显著。

5 降水、地下水位影响机制探讨

合肥台 NS 向、NW 向地电阻率与地下水位、降水对应关系较好, 夏季降水增大, 地下水位处于高值波动, 地电阻率处于低值区域波动, 10 月至次年 3 月合肥地区降雨量较少, 地下水位比较低时, 地电阻率处于高值区域。很多学者对地电阻率变化的微观机理进行研究, 建立在多种室内和室外实验基础上的研究表明^[12], 岩石电阻率变化主要是受外界环境条件变化进而导致结构中导电通路变化所引起, 其中阿契定律的扩展^[13-14]使岩石电阻率微观机制的分析更加清晰, 用于描述不同结构之间的岩石电阻率与结构参数之间的定量关系, 可以对地电阻率与岩石内部结构及含水状况的关系进行解释。

$$\rho_R = \alpha \rho_0 \eta^{-m} s^{-n} \quad (5)$$

其微分形式为

$$\frac{\rho_R}{\rho_0} = \frac{\rho_0}{\rho_0} - m \frac{\eta}{\eta} - n \frac{\Delta s}{s} - (\ln \eta) \bullet \Delta m - (\ln s) \bullet \Delta n \quad (6)$$

$$\frac{\rho_R}{\rho_0} \approx \frac{\rho_0}{\rho_0} - n \frac{V_\omega}{V_\omega} + \frac{n-m}{\eta} \frac{\Delta V_T}{V_T} - (\ln \eta \bullet \Delta m) \quad (7)$$

式中, α 为常数, P_R 、 P_0 分别为介质电阻率、孔隙中流体电阻率; η 为孔隙度 ($\eta = V_P/V_T$, V_P 为岩石中孔隙的体积, V_T 为岩石总体积); s 为孔液流体饱和度 ($s = V_\omega/V_P$, V_ω 为孔隙流体体积); m 为结构系数的常数, n 表示与含水量有关的常数。式 (5) 中的 5 个参数改变均会使得地电阻率发生改变, 根据研究认为孔隙含水量的变化和结构指数变化的效应均对地电阻率有影响, 尤其是孔隙含水量的变化, 观测场地下浅水水位的涨落, 使得表层含水量随之增减, 这是表层介质电阻率变化的主要原因。

合肥台地电阻率观测供电极距较短仅有 600 m, 探测深度较浅, 观测场地被密集的植被覆盖, 并存在南高北低、西高东低的地形高差, 因此受其台址条件的限制, 使地电阻率观测结果受表层介质电阻率影响较大。合肥台地电阻率年变化为“冬高夏低”形态, 主要是表层电阻率受到潜水位升降影响表现出与其相反的年变化, 而合肥台地下浅层水补给源主要为当地降雨, 使得地电阻率、降雨、地下水位三者关系密切, 地下水位影响更为直接。

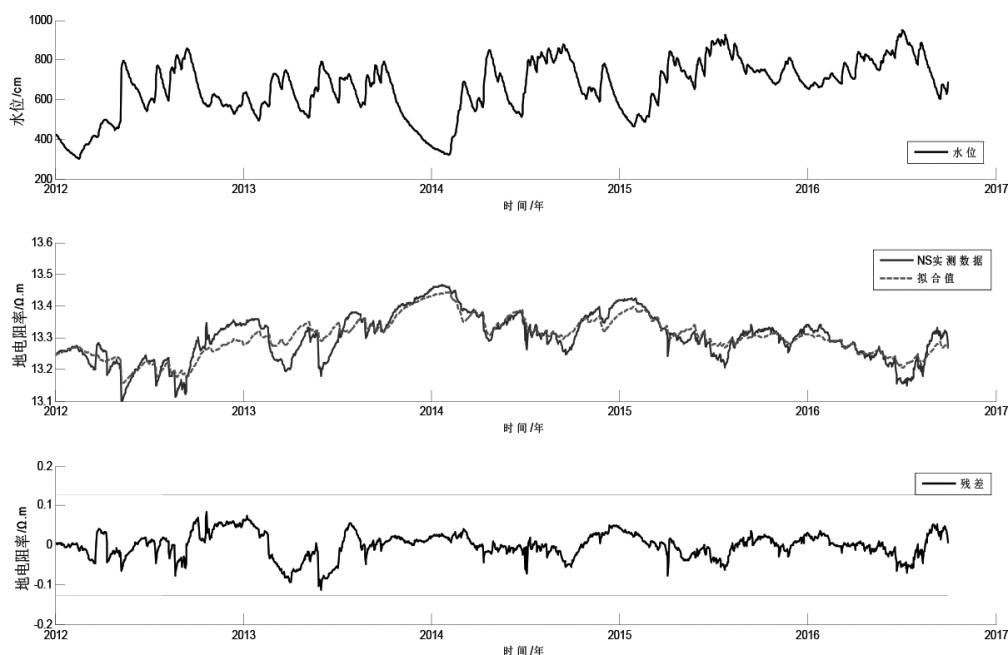


图5 地下水位影响校正后的 NS 向地电阻率曲线

Fig.5 NS ground resistivity curve corrected by groundwater level effect

6 结语

通过对合肥台地电阻率观测系统检查、环境调研以及对降雨量和钻孔水位辅助资料的定性定量分析,认为 NS 向地电阻率趋势性下降变化属于干扰所致,非地震前兆异常,2015—2016 年降雨量显著增多、地下水位抬升是导致该异常变化的重要因素,2015 年 11 月罕见的强降雨以及水位上升致使 NS 向地电阻率年变化上升形态畸变。合肥台受其台址条件的限制,地电阻率 NS 向和 NW 向“夏低冬高”年变形态以及中长期变化主要是降雨量和地下水位引起的。在资料分析处理中,应当选用褶积滤波和线性回归分析方法去掉相应干扰,有效地消除影响,使数据变化平稳,更容易识别。降雨及地下水位影响机制比较复杂,不同的地下电性结构、水文地质环境以及渗透过程对其影响程度也不尽相同,有关这一问题还需结合周边环境及地质构造进一步研究分析。

参考文献:

- [1] 王志贤,汪志良,赵成达. 地震地电阻率前兆异常特征及其机理研究[J]. 华北地震科学. 1993,11(2):759-82.
- [2] 杜学彬,谭大诚. 地电阻率 1 年尺度异常时空强丛集现象与地震活动[J]. 中国地震,2000,16(3):283-292.
- [3] 钱家栋,马钦忠,等. 汶川 M_s 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,2013,35(1):4-17.
- [4] 钱复业,赵玉林,许同春,等. 地电阻率季节干扰变化分析[J]. 地震学报,1987,9(3):289-302.
- [5] 张学民. 地电阻率的年变畸变异常分析[J]. 地震地磁观测与研究,2004,25(1):68-74.
- [6] 张有林,朱生水,凌学书,等. 合肥地震台地下电性层研究[J]. 防灾技术高等专科学校学报,2005,7(2):40-42.
- [7] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范 [S]. 北京:地震出版社,2001.
- [8] 钱家栋,曹爱民. 1976 年唐山 7.8 级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究[J]. 地震,1998,18(Z1):1-9.
- [9] 刘允秀,陈华静,程瑞年,等. 地电阻率与地下水位、大气降水关系研究[J]. 中国地震,1999,15(2):184-189.
- [10] 张学民,王志贤,臧明珍,等. 降雨对地电阻率干扰的分析[J]. 华北地震科学,1996,14(4):71-75.
- [11] 张国苓,乔子云,贾立峰,等. 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,2013,34(5):141-143.
- [12] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Trans AIME. 1942,146(1):54-62
- [13] 钱家栋,赵玉林,桂泰,等. 国内外地电预报地震研究动态与展望[M]. 中国地震预报方法研究. 北京:地震出版社,1991.
- [14] 钱家栋,陈有发. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社,1985.