

宝昌台地电阻率变化特征*

戴勇¹, 高立新¹, 高昌志², 赵蒙生¹, 张国清³

(1. 内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 宝昌地震台, 内蒙古 太仆寺旗 027000;
3. 乌加河地震台, 内蒙古 乌拉特中旗 015300)

摘要: 对宝昌台地电阻率日变、年变和长期变化3种典型变化进行了分析, 结果显示: 整点值曲线存在明显的日变形态, 可能是由外线系统对地绝缘不良造成的; 地电阻率年变主要是由气象因素年变引起的, 其中温度和降雨量贡献基本相同; 地电阻率NS测道存在长期下降变化, 而EW测道没有, 这一现象与测区内水位、温度和降雨量等长期变化无关, 主要是由于受到台站所在区域近EW向应力长期、持续作用引起的, 并不对应地震。

关键词: 宝昌台; 地电阻率; 特征变化; 机理

中图分类号: P319

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)03-0358-06

0 引言

由于气象、环境等因素影响, 地电阻率观测数据通常情况下并不是一条平直的曲线, 而是具有趋势变化、年变和脉冲等多种变化形态的曲线。与地震孕育、发生有关系的震前兆异常因上述变化的存在, 通常被弱化甚至被掩盖, 因此分析地电阻率曲线典型变化特征, 并研究其产生机理, 对于识别和提取前兆异常具有非常重要的意义。宝昌台(41.90°N, 115.27°E)位于内蒙古太仆寺旗, 地貌为低山丘陵地带, 覆盖层较浅(内蒙古自治区地震局, 2006), 该台地电阻率自1980年投入观测, 对曾发生于晋冀蒙交界地区的地震, 在震前有不同程度异常反映(高立新, 黄根喜, 1999; 黄根喜, 2000; 戴勇等, 2009)。本文主要通过小波变换、相关分析等方法研究宝昌台地电阻率存在的典型变化特征, 并从气象因素、区域应力场等角度解释其产生机理。

1 地电阻率变化特征

宝昌台地电阻率变化主要有非周期性变化和周期性变化。典型的非周期性变化主要为地电阻

率NS测道, 自1993年至今呈现长期下降变化(图1)。而处于同一测区的地电阻率EW测道观测数据却没有出现类似NS测道的显著的趋势下降, 从这一角度来说, 宝昌台地电阻率长期变化具有各向异性变化。

为准确获取宝昌台地电阻率存在的周期性成分, 采用快速傅里叶变换方法(FFT)(万永革, 2007)对2008年1月1日至2012年4月30日的地电阻率整点值数据和1993年1月1日至2012年4月30日的日均值数据分别进行振幅谱分析。结果显示, 地电阻率两测道整点值数据对应振幅谱都存在一个变化幅度大的单峰值形态(图2), 其峰值频率一致, 都为 1.157×10^{-5} Hz(对应周期24 h), 这说明宝昌台地电阻率整点值曲线存在典

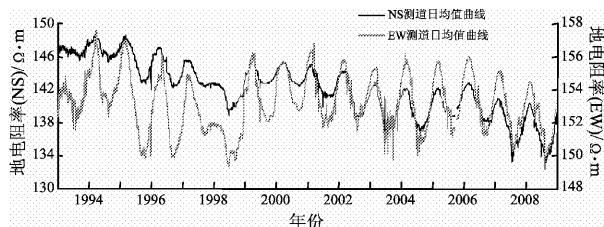


图1 宝昌台地电阻率日均值曲线

Fig. 1 Daily mean value curve of earth resistivity rate recorded by Baochang Station

* 收稿日期: 2012-06-13.

基金项目: 青年震情跟踪课题(2012020406、2011020402、2009020804)、2012年度中国地震局“地震监测、预报、科研三结合”课题(基于小波变换方法的前兆数据分析)及地震行业科研专项经费项目(201208009)联合资助。

型的日变特征；地电阻率两测道日均值数据对应振幅谱也都存在一个变化幅度大的单峰值形态，其峰值频率一致，都为 3.115×10^{-8} Hz（对应周期是372 d），这说明宝昌台地电阻率日均值曲线存在典型的年变特征。

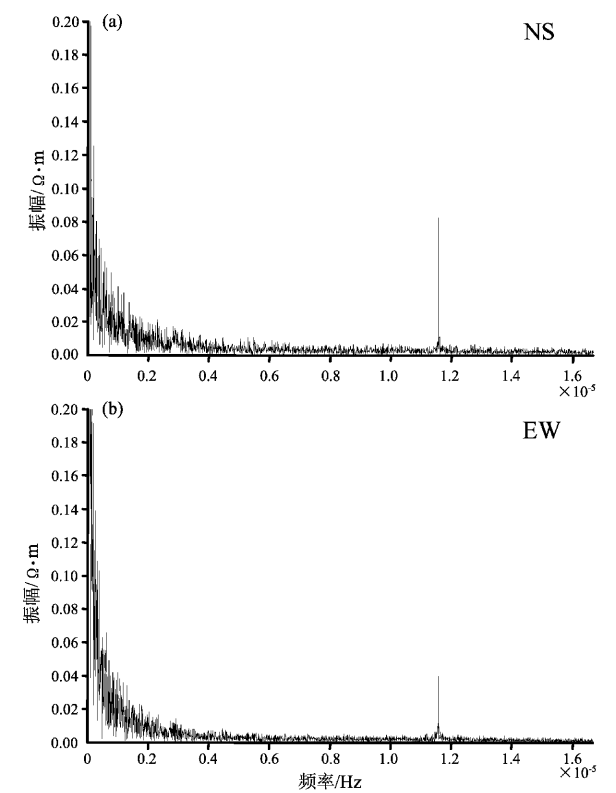


图2 宝昌台地电阻率整点值振幅谱

Fig.2 Amplitude spectrum of the earth resistivity rate hour value recorded by Baochang Station

2 日变特征

2.1 日变特征分析

笔者选取宝昌台2012年4月1~30日的地电阻率整点值资料进行分析，发现EW测道具有明显的日变形态，但NS测道该形态并不十分明显。在此采用小波方法对地电阻率数据进行去噪处理。去噪后的地电阻率NS测道整点值曲线，与去噪前相比，对随机波动的抗干扰能力强，且具有明显的日变形态，将其与去噪后的地电EW向整点值曲线进行比较，注意到两者基本重合（图3），说明宝昌地电两测道整点值曲线日变形态基本一致，同时也注意到两测道出现日变畸变时段也较为一致。

图4显示的是宝昌台地电阻率（NS）整点值日变最大值和最小值对应时刻随时间变化关系，2008年1月至2009年6月最大值和最小值时刻虽总体分属于0~11 h、12~23 h两个区间，但是较为离散，2009年7月之后，最大值和最小值时刻趋于集中，其中最大值时刻集中于C区间，而最小值时刻集中于A和B区间，这说明2009年7月之后地电阻率日变形态趋于稳定。

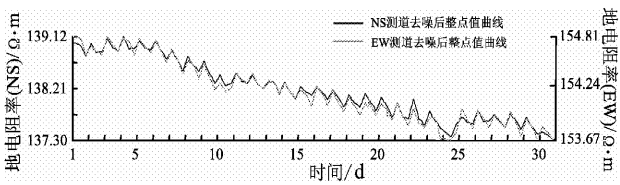


图3 宝昌台地电阻率整点值曲线（2012年04月）

Fig.3 Hour value curve of earth resistivity recorded by Baochang Station (Apr., 2012)

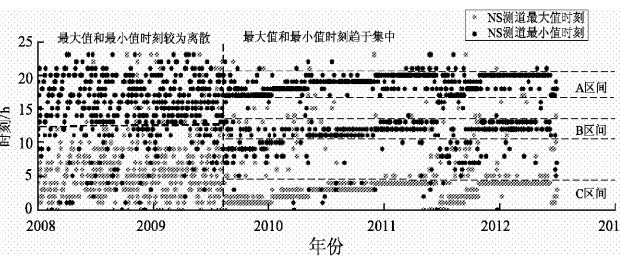


图4 宝昌台地电阻率（NS）日变最大值和最小值对应时刻随时间变化关系

Fig.4 The corresponding moment of the maximum and the minimum daily of earth resistivity rate recorded by Baochang Station varying with time

2.2 影响因素分析

宝昌台地电阻率整点值曲线，类似于大地电场等，也存在规则的日变形态（李飞等，2011），可能是由一个或者多个具有周期特征的影响因素对地电阻率独立或者叠加施加作用产生的。

首先选取宝昌台地电场、锡林浩特地磁及宝昌台固体潮汐理论值，与同时段的宝昌地电阻率两测道整点值进行对比，结果显示：（1）宝昌台地电阻率日变形态与地电场、地磁形态相差甚远；（2）将宝昌台地电阻率整点值（去噪）与该台固体潮汐理论值以及滤除半日潮汐波之后的固体潮汐理论值进行逐日相关性分析，二者之间具有一定相关性，但关系不显著。

气象因素中,具有短周期性变化特征,且对地电阻率变化具有明显影响的物理量,仅有温度。

(1) 通过相关系数方法,定量分析宝昌地电阻率与测区内气温之间的相关性特征,以寻找出制约地电阻率变化的主要因素。选取宝昌台地电阻率和温度 2008 年 1 月 1 日至 2012 年 4 月 30 日整点值数据,首先利用小波方法对地电阻率进行去噪处理,在此基础之上逐日计算地电阻率与温度之间的简单相关系数,2012 年 4 月 30 日温度缺数未参与计算。地电阻率 NS 测道与温度的相关性结果(图 5)显示,相关系数 r 为负数,且 $|r| \geq 0.60$ 的天数占参与计算的总天数的 49.34%,显著性水平 $p \leq 0.05$ 的天数占参与计算的总天数的 70.84%;地电阻率 EW 测道与温度的相关性结果显示,相关系数 r 为负数,且 $|r| \geq 0.60$ 的天数占参与计算的总天数的 37.63%,显著性水平 $p \leq 0.05$ 的天数占参与计算的总天数的 68.31%。统计结果表明,宝昌台地电阻率与测区温度之间的日相关主要是以负相关为主,且相关关系显著。

(2) 仅从数学角度定量研究,结果显示温度是导致宝昌台地电日变的主要原因,但这是否是真实情况的反应,还需作进一步讨论:① 宝昌台地电阻率自 2006 年开始采用 ZD8B 地电仪,观测室内温度为 18 ~ 22 ℃。地电外线路主要按照 NS、EW 两测道布线,其中两测道供电电极距和测量极距均相同,分别为 560、80 m;2005 年 9 月对外线路进行了改造,外线路全部更换为铜芯屏蔽电缆,电极全部更换为新的铅电极,电极埋深 3.5 m;改造初期由于用于固定电缆的钢绞线与电线杆之间未用瓷瓶隔开,导致下雨时地电阻率出现初期上升变化,之后才下降的现象,2007 年 5 月采用瓷瓶隔开,该现象不明显。② 自瓷瓶安装之后,至今没有清洁过,这可能是导致地电阻率日变的主要原因:由于瓷瓶未定期清洁,外线系统在对地绝缘方面稳定性差,每天进入晚间之后随着温度的降低,空气中冷凝水附着在瓷瓶上造成钢绞线与大地连通,电阻率整体上升,进入白天之后温度升高瓷瓶绝缘性增加,地电阻率整体下降。为验证这一分析是否准确,2012 年 8 月 26、27 日对 NS 测道的瓷瓶进行了清洁,之后地电阻率 NS 向日变虽仍存在,但幅度有所减小(图 6)。

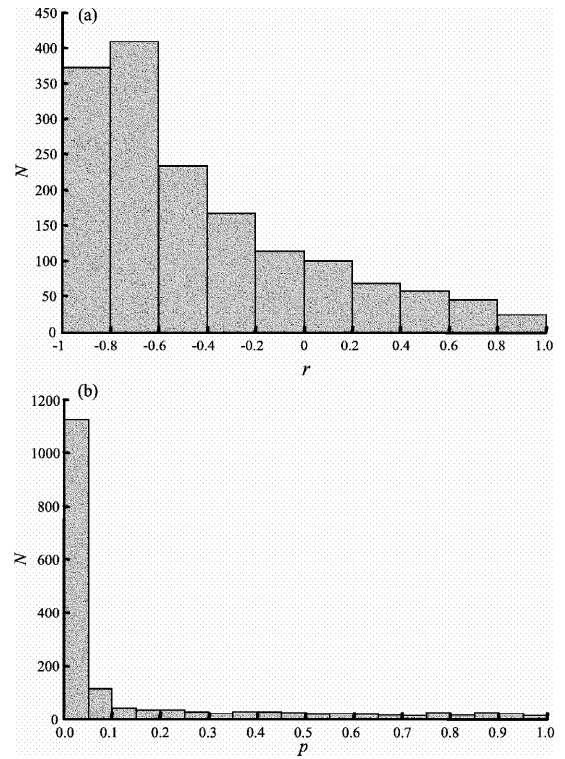


图 5 宝昌台地电阻率 NS 测道与温度整点值逐日相关统计结果

Fig. 5 Daily correlation stastics of the earth resistivity rate in NS-direction and tempreture hour value recorded by Baochang Station

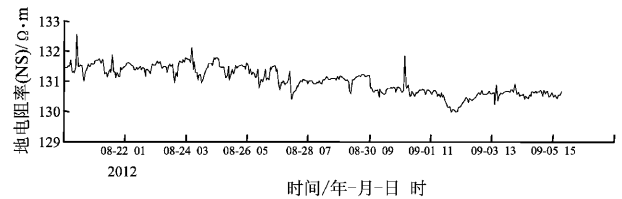


图 6 宝昌台地电阻率 NS 测道整点值曲线

Fig. 6 Hour value curve of earth resistivity rate in NS-direction recorded by Baochang Station

3 年变特征

宝昌台地电阻率 NS、EW 两测道都具有明显的年变,一般情况下,3 月最高、9 月最低,即具有典型的“夏低冬高”的年变形态。众多学者研究表明,地电阻率年变主要是由气象因素等周期性年变引起的(徐世浙,1985;刘允秀,陈华静,1999;李飞,姚伟中,2004;张学民,2004)。为定量研究宝昌台地电阻率年变是由气象因素中哪

一个物理量主导的，在此选取宝昌台地电阻率1993年1月至2008年12月的月均值数据和宝昌台测区同期温度、降雨量数据进行了相关分析。统计结果显示，宝昌台地电阻率与测区温度、降雨量之间均存在较为显著的年相关，且以负相关为主，温度、降雨量在对地电阻率产生年变的贡献上基本相同（表1）。部分年相关系数较低，甚至出现正相关现象，这可能是由于地震前兆异常或者短期干扰等对地电阻率年变产生影响，导致年变畸变。

同处于内蒙古中部的乌加河台地电阻率曲线具有“夏高冬低”的反向年变特征，正好与宝昌台地电阻率曲线具有的年变特征相反。乌加河台、宝昌台干扰模型虽然同属a类干扰（即一层电阻率发生季节性变化的模型），但两台站地下电性结构不同，其中乌加河台地电断面为KQQ型（中间层电阻率高于表层及底层电阻率）（国家地震局预测预防司，1998），宝昌台地电断面为H型（中间层电阻率低于表层及底层电阻率）（国家地震局科技监测司，1988）。依据钱复业等（1987）的研究成果，当乌加河台供电极距在180~2 000 m之间时，a类干扰K型地电断面出现明显反常的季节变化（夏高冬低），而当宝昌台供电极距为560 m时，a类干扰H型地电断面出现明显正常的季节变化。

表1 宝昌台地电阻率与温度、降雨量整点值逐日相关统计结果

Tab. 1 Daily correlation stastic result between earth resistivity rate and tempreature, rainfall hour values

地电电阻率 (分析年数占参与计算年数比例)	与温度相关统计结果		与降雨量相关统计结果	
	(分析年数占参与计算年数比例)		(分析年数占参与计算年数比例)	
	$r \leq -0.60$	$p \leq 0.05$	$r \leq -0.60$	$p \leq 0.05$
NS	43.70%	43.75%	43.75%	50.00%
EW	56.25%	56.25%	43.75%	37.50%

4 长期变化特征

宝昌台地电阻率NS测道自1993年至今一直存在长期下降变化，而EW测道没有出现长期单调变化。全国地电台网中有很多地电台站存在着类似于宝昌台地电阻率NS测道的长期单调变化的现象，如天津宝坻台存在单调下降变化，山西大同

台存在单调上升变化等。虽然这一变化和形变数据由于零漂造成的单调变化，在形态上类似，但机理上不一样，该现象的出现并不是仪器本身造成的。对于地电阻率长期变化，赵和云（1994）总结了26年来全国近百个台站的地电阻率观测资料，认为“斜”型趋势变化一般不对应地震。在对地电阻率存在的长期单调变化现象异常信度判定，以及是否将其纳入会商判定依据，存在着不同的意见。因此，对地电长期变化产生的机理研究，具有十分重要的意义。本文采用拟合等方法，从气象、应力等角度，结合前人提出的各向异性理论，来解释宝昌台地电阻率NS测道长期下降变化机理。

4.1 地下水位、气象因素对地电阻率影响分析

位于宝昌台测区南端有一口水井，记录了2004年4月至2008年7月地下潜水位埋深数据，宝昌台测区潜水位埋深平均为6.21 m，每年因灌溉等有波动，变化幅度为14%。依据宝昌台钻孔剖面图及电测深曲线，该台地下电性结构可分3层，第一层主要是高电阻率的砂碎石层（0~8.5 m），第二层是由精砂、细砂和砂土组成的低电阻率层（8.5~62.5 m），第三层是由砂砾岩及石英斑岩组成的高电阻率层（62.5 m以下）。宝昌台水位虽逐年趋于下降，但这并不是导致地电阻率NS测道下降的主要因素，因为宝昌台水位主要在第一层内变化，对决定该台地电阻率长期变化的第二、三层电阻率影响较小。

为确定宝昌台地电长期变化是否由降雨量、温度等气象因素引起的，在此将宝昌台地电阻率NS测道1993年1月至2008年12月月均值数据 ρ 与同期的降雨量 Y 、温度 W 进行了线性回归，得到的回归关系为 $\rho = a_0 + a_1Y + a_2W$ ，其中 $a_0 = 142.6267$ ， $a_1 = -0.0010$ ， $a_2 = -0.0521$ ，并依据拟合关系给出了仅由降雨量、温度引起的地电阻率NS测道变化曲线（图7）。结果显示，由气象因素引起的地电阻率变化没有明显的趋势下降特征。这说明宝昌地电NS测道长期变化有可能是由于区域应力作用产生的。

4.2 应力场对宝昌地电阻率影响分析

宝昌台所在的华北地区构造复杂，断裂纵横交错，形成了一系列大的构造带。徐菊生等（1999）利用GPS观测结果，通过反复调整应力边

界条件,计算得到了华北地区的应力、应变、位移数据,结果表明,华北地区现今构造应力场的基本特征是优势压应力方向为北东东。本文采用《中国震例》提供的资料(张肇诚,1990;张肇诚等,2000;陈棋福等,2003),统计了宝昌台周边区域典型地震震源机制解特征(表2),结果表明地震震源机制反映出的主压应力方位均为NEE-SWW。因此可确定宝昌台所在区域受到的主压应力是近EW向的。

在地震孕育发展阶段,直至地震发生过程中,通常可以观察到位于孕震区的地电存在各向异性变化现象,很多学者通过实验或者模型,对该现象进行了验证和解释(毛桐恩等,1999;冯志生等,2004),笔者借用杜学彬等(2001)解释强震近震中区地电变化速率的各向异性理论,来分析宝昌地电NS测道长期变化特征。宝昌台所在区域由于长期受

到近EW向主压应力持续作用,造成介质内部裂隙走向逐渐沿主压应力方向优势排列,导电通道连通、导电流体(如水)进入或重新分布,造成以主压应力方向真电阻率持续下降为主的真电阻率变化各向异性,导致以垂直主压应力方向的宝昌台地电NS测道持续下降为主的视各向异性。

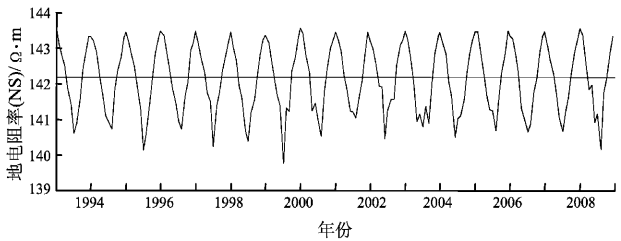


图7 宝昌台地电阻率NS测道理论值曲线
Fig.7 Theoretical value of earth resistivity rate in NS direction at Baochang Station

表2 宝昌台周边区域典型地震应力特征

Tab.2 Typical seismic stress characteristic in Baochang Station and its adjacent area		
华北地区主要地震事件	主压应力或主张应力轴方位	备注
1976年4月6日 内蒙古和林格尔M _s 6.3地震	NEE向主压应力,NNW向主张应力场	右旋走滑为主的逆断层
1989年10月19日 山西大同—阳高M _s 6.1地震	主压应力优势方向为NEE,主张应力优势方向为NNW,两个主应力轴方向都是近水平的,与华北现代应力场的基本特征一致	
1998年1月10日张北M _s 6.2地震; 1999年3月11日张北M _s 5.5地震	主压应力轴方位NEE-SWW向、近于水平	最大主压应力轴与张北地震一致;张北地震的序列的破裂面为NNW、NNE方向组合,恰好是华北构造应力场最大剪切应力方向
1999年1月29日 锡林浩特M _s 5.2地震	NEE向主压应力、NNW主张应力	右旋走滑兼正断错动
1999年11月1日 大同M _s 5.2地震	主压应力方向为NE66°,主张应力方向为NW18°; 主压应力轴仰角近水平,主张应力轴仰角为32°	震源错动以走滑为主

5 结论与讨论

宝昌台位于晋冀蒙交界地区,自投入观测以来地电阻率连续、稳定,典型变化特征明显,且对台站所在区域的地震具有较好的前兆异常反映。宝昌台地电阻率既有时间段较长的模拟数据,也有质量较为理想的整点值数据,气象要素等辅助观测较为完善。宝昌台地电阻率在全国地电台网的地电资料中具有代表性,研究该台地电阻率的典型变化特征,对于今后研究全国其它地电阻率变化特征具有重要意义。

(1) 通过快速傅里叶变换方法,分别得到宝昌台地电阻率整点值、日均值对应的振幅谱。宝昌台地电阻率不仅具有早已熟知的年变特征,还具有日变特征。

(2) 宝昌台地电阻率EW测道具有较为清晰的日变特征,但是NS测道由于噪声较大,日变特征不明显。通过小波方法对宝昌台地电阻率进行了去噪处理,发现两测道都具有清晰的日变形态,且基本重合。将地电阻率去噪后的结果,与同期的温度进行相关性分析,发现二者之间具有显著相关性。进一步分析认为,该现象可能是由于外线路系统对地绝缘不良造成的。

(3) 宝昌台地电阻率具有明显的“夏低冬高”年变特征,这主要是由温度和降雨量等气象因素年变引起的。宝昌台和乌加河台地电阻率年变形态相反,这主要是由两台站地下电性结构差异引起的。

(4) 宝昌台地电阻率长期变化存在各向异性特征,其中 NS 测道具有下降变化,而 EW 测道则没有。将宝昌台地电阻率 NS 测道 1993 ~ 2008 年月均值数据与该台所在区域温度、降雨量同期月均值数据进行定量分析,发现 NS 测道具有的长期变化与测区的水位、温度和降雨量的长期变化无关,主要是由于受到台站所在区域近 EW 向应力场长期、持续作用引起的。

参考文献:

- 陈棋福,郑大林,高荣胜. 2003. 中国震例(1997 ~ 1999) [M]. 北京:地震出版社.
- 戴勇,闫海宾,丁风和,等. 2009. 张北 6.2 级地震宝昌地震台地电异常特征及机制分析[J]. 地震地磁观测与研究,30(1):51 ~ 55.
- 杜学彬,阮爱国,范世宏,等. 2001. 强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报,23(3):289 ~ 297.
- 冯志生,杨建军,梅卫萍,等. 2004. 华东地区地电阻率各向异性度的地震前兆异常特征初步研究[J]. 地震学报,26(2):223 ~ 227.
- 高立新,黄根喜. 1999. 张北—尚义 6.2 级地震(1998-01-10)前倾斜与地电阻率前兆异常[J]. 地壳形变与地震,19(4):88 ~ 90.
- 国家地震局科技监测司. 1988. 地震监测与预报方法清理成果汇编——地磁、地电分册[M]. 北京:地震出版社.

- 国家地震局预测预防司. 1998. 电磁学分析预报方法[M]. 北京:地震出版社.
- 黄根喜. 2000. 张北 6.2 级地震前宝昌地震台的前兆异常研究[J]. 华北地震科学,18(1):45 ~ 48.
- 李飞,姚伟中. 2004. 新沂地震台地电阻率与地下水位和降水的关系研究[J]. 地震研究,27(4):326 ~ 329.
- 李飞,韩晓飞,孙雷,等. 2011. 新沂台地电场与地磁场、连云港台体应变的日变化分析[J]. 地震研究,34(4):457 ~ 465.
- 刘允秀,陈华静. 1999. 地电阻率与地下水位、大气降水关系研究[J]. 中国地震,15(2):184 ~ 189.
- 毛桐恩,胥广银,范思源,等. 1999. 地电阻率各向异性度的动态演化图像与地震孕育过程[J]. 地震学报,21(2):180 ~ 186.
- 内蒙古自治区地震局. 2006. 内蒙古自治区地震监测志[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社.
- 钱复业,赵玉林,许同春. 1987. 地电阻率季节干扰变化分析[J]. 地震学报,9(3):289 ~ 302.
- 万永革. 2007. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京:科学出版社.
- 徐菊生,袁金荣,高士钧,等. 1999. 利用 GPS 观测结果研究华北地区现今构造应力场[J]. 地壳形变与地震,19(2):81 ~ 89.
- 徐世浙. 1985. 视电阻率年变的定量计算[J]. 地震学报,7(4):422 ~ 427.
- 张学民. 2004. 地电阻率的年变畸变异常分析[J]. 地震地磁观测与研究,25(2):68 ~ 74.
- 张肇诚,郑大林,徐京华. 2000. 中国震例(1989 ~ 1991) [M]. 北京:地震出版社.
- 张肇诚. 1990. 中国震例(1976 ~ 1980) [M]. 北京:地震出版社.
- 赵和云. 1994. 地电阻率趋势变化的形态特征与地震[J]. 地震学报,16(3):368 ~ 375.

Variation Characteristic of Earth Resistivity at Baochang Station

DAI Yong¹, GAO Li-xin¹, GAO Chang-zhi², ZHAO Meng-sheng¹, ZHANG Guo-qing³

(1. Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

(2. Baochang Seismic Station, Taipusiqi 027000, Inner Mongolia, China)

(3. Wujiahe Seismic Station, Urad Middle Banner 015300, Inner Mongolia, China)

Abstract

Three kinds of typical variations of earth resistivity at Baochang Station are analyzed, which includes daily, annual and secular variations. The result shows that there exists significantly daily variation morphology in the curve of earth resistivity hour-point values, which is caused by unstable insulating properties of transmission lines. The annual variation of earth resistivity is mainly caused by meteorological factors including temperature and rainfall. There exists secular oblique-type variation only in the curve of earth resistivity in NS direction, which is not related with the secular variation of water level, temperature, and rainfall etc.. However it is mainly caused by the long-time prolonged action of stress in EW direction, which is not corresponding with the earthquake.

Key words: Baochang station; earth resistivity; characteristic change; mechanism