

内蒙古宝昌台地电阻率长期观测数据研究^①

徐锡泉¹, 高昌志², 王亮¹

(1. 内蒙古自治区地震局呼和浩特基准地震台, 内蒙古 呼和浩特 010010;

2. 内蒙古自治区地震局宝昌地震台, 内蒙古 太仆寺旗 027000)

摘要:分析了内蒙古宝昌台地电阻率长期观测数据的可靠性,应用归一化变化速率方法和傅氏滑动方法处理了1985年以来的地电阻率观测数据,研究了该台在地震前中期、短期阶段的监测效能,结果显示:该台两个正交测道的地电阻率观测对台站周围的中等以上地震有一定的监测能力,表现出了与地震有关的震前持续性的中期、短期异常,且在中国大陆及周边发生的数次远距离8级以上大地震前也记录到持续1年尺度时间的下降/上升异常。

关键词:宝昌台;地电阻率;异常;地震;远距离

中图分类号: P315.722

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)02-0405-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2014.02.0405

Study on Long-term Observation Data of Earth Resistivity at Baochang Station in Inner Mongolia

XU Xi-quan¹, GAO Chang-zhi², WANG Liang¹

(1. Hohhot Seismic Station, Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China;

2. Baochang Seismic Station, Earthquake Administration of Inner Mongolia Autonomous Region, Taipusi, Inner Mongolia 027000, China)

Abstract: Since the Xingtai earthquake in 1966, the geo-electrical resistivity observation has been implemented in a large scale in China. At present, approximately 90 geo-electrical resistivity stations are in operation in mainland China as a result of network construction in the period from the seventh five-year plan to the tenth five-year plan. In the long-term observation, significant anomalies in geo-electrical resistivity have been recorded before the $M_s 7.8$ Tangshan earthquake in 1976, the $M_s 7.2$ Songpan—Pingwu earthquake in 1976, the $M_s 7.6/7.2$ Lancang-Gengma earthquakes in 1976, and the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake in 2008. Moreover, several moderate-strong earthquakes have been accurately forecasted on the basis of geo-electrical resistivity observation. However, many people still have different understandings on the anomalies in geo-electrical resistivity before earthquakes due to lack of knowledge of earthquake preparation and occurrence processes, crustal structure, and medium conditions from the epicentral area to observation station and dynamical processes of underground media. Such confusion may be attributed to the small detecting depth/range of current DC geo-electrical resistivity stations and the complicated behaviors of anomalies in geo-electrical resistivity that include the anomalous changes caused by observational environments. The Baochang geo-electrical resistivity station in Inner Mongolia has continually observed for more than 30 years and has met the technical requirement of geo-electrical resistivity observation in China. Many moderate and great earthquakes have occurred near this sta-

① 收稿日期: 2013-06-07

基金项目: 2012年度“地震监测、预报、科研三结合”课题

作者简介: 徐锡泉(1967—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 现从事台站地震监测预报工作。E-mail: nmhdd@126.com

tion. This study evaluates the reliability of long-term geo-electrical resistivity observation data of the station by processing the data recorded since 1985 by using the normalized variation rate method and the Fourier sliding method for identifying earthquake-related anomalies in geo-electrical resistivity and studies the monitoring ability in the medium term and imminent stages before an earthquake occurs. The research results are as follows: Baochang station has not been affected by the observational environment in the long-term. Its observation data are valuable in earthquake scientific research and earthquake prediction, and the anomalies identified by the aforementioned two methods are credible. We believe that the geo-electrical resistivity observation of station Baochang has certain monitoring ability for moderate-great earthquakes near the station. The geo-electrical resistivity of two orthogonal channels of the station has shown continuous medium-term and short-term anomalies around the station related to the earthquakes. Furthermore, the decreasing or increasing anomalies which lasted for one year, were also recorded before the long-distance $M_s 8.0$ or above earthquakes that occurred near mainland China and its surrounding area, which were historically well corresponded to the occurrence of the great earthquakes.

Key words: Baochang station; geo-electrical resistivity; anomaly; earthquake; long-distance

0 引言

1966 年邢台地震后,我国地电阻率观测开始规模性建设,经过“七五”至“十五”项目的建设,目前建成并运行近 90 个地电阻率台站。在台网运行期间的 1976 年唐山 $M_s 7.8$ 地震、1976 年松潘—平武 $M_s 7.2$ 地震、1988 年澜沧—耿马 $M_s 7.6/7.2$ 地震、2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震前记录了显著的地电阻率异常^[1-5],同时利用电阻率观测对某些中等地震还进行了一定程度的地震预测预报^[6-7]。由于对地震的孕育和发生过程以及震中区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较小,且观测环境引起的外界干扰不能完全排除,造成观测数据有多重复杂性,人们对地震前能否观测到地电阻率前兆异常认识不一。内蒙古宝昌台地电阻率观测历时 30 多年,属于长期以来观测环境符合地电阻率观测技术要求的台站之一,且台站周围发生过多次中等及以上地震。本文通过对宝昌台长程地电阻率数据观测数据的处理、分析研究该台地电阻率映震效能,期望获得对地电阻率地震监测效能的客观评价以及对地震地电阻率异常表现的有意义认识。

1 宝昌台地电阻率观测概况

宝昌台位于内蒙古自治区锡林郭勒盟太仆寺旗宝昌镇($E115.27^\circ$ 、 $N41.90^\circ$),属于首都圈外围台站。在地质构造上属阴山构造带的内蒙地轴东段,所在阴山构造带东南与燕山构造带交汇、西南与山西构造带交汇(图 1)。台站布极区地貌为低丘陵地

带,覆盖层较浅,基岩埋深约 90 m,岩性为长石、石英斑岩。

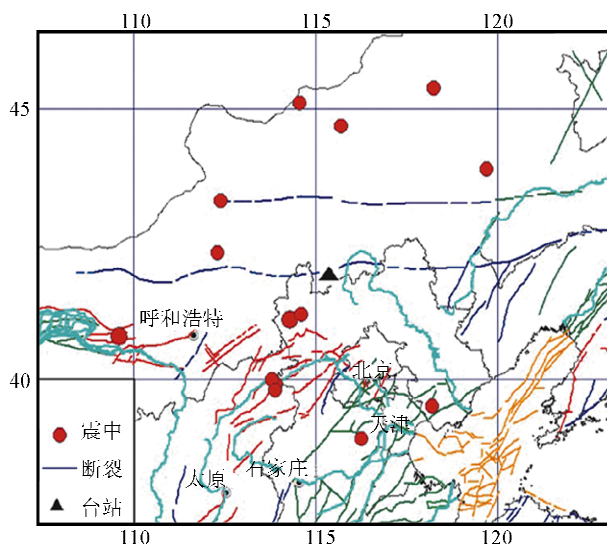


图 1 宝昌台、震中、断层分布图

Fig. 1 Distributions of Baochang geo-resistivity station, epicenters and faults

该台地电阻率自 1980 年 1 月开始观测,外线路布设 NS 向和 EW 向两条测线,布局呈“L”形,供电极距为 560 m,测量极距为 80 m(图 2),这个供电极距小于全国绝大多数台站的极距。自 1980 年起至今台站布极区观测环境未发生明显改变,属于我国地电阻率观测中为数不多的观测环境长期较好的台站之一。该台地电观测最初使用 JDC-2 型物探自动补偿电差位计,1983 年 6 月更换为 DDCJ-1 型物探补偿仪,1987 年 7 月更换为 DDC-2B 自动补偿仪,2001 年 3 月又更换为 ZD8B,2006 年 10 月又更

换为 ZD8BI 数字自动地电仪并使用至今。2005 年 10 月以前外线路采用铜包钢裸线,“十五”改造后供电线、测量线使用绝缘电缆线,电缆线悬挂在钢绞线上,钢绞线固定在线干瓷瓶上。供电电极、测量电极材料铅板,地下埋深 3.5 m。长期以来外线路绝缘性能、电极接地电阻等符合地电阻率观测的技术要求。

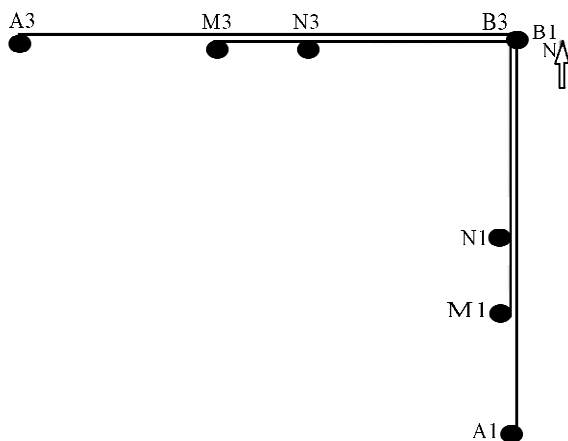


图2 宝昌台地电阻率观测布极示意图

Fig. 2 The observational configuration of the geo-resistivity at Baochang station

2 观测资料和附近地震

图3是宝昌台自建台运行观测以来的地电阻率日均值曲线(1980年1月1日—2013年7月20日),其长程地电阻率变化非常复杂。由图可见,1980—1984年的观测数据基本无法使用;1985—1992年的观测数据可能是观测装置改变,地电阻率出现大幅度的阶跃型下降,完全不同于这个时段前后的数据变化;1993—2013年7月20日地电阻率变化趋势比较连续,但2009年11月份—2011年7月移动公司在布极区埋设光缆和钢绞线(2011年7月底拆除,改为空架线)引起EW测道地电阻率大幅度快速下降,对NS测道地电阻率观测也造成干扰,只是比EW测道影响幅度向小很多。另外还能注意到在这个时段内存在地电阻率阶段性的长趋势变化,大致在NS测道是1993年—1999年初、1999年下半年—2004年、2005年—2013年7月20日,地电阻率变化明显,为每个阶段内相对稳定的长趋势变化;EW测道基本上也可以分为这三个时段的变化(不过光缆埋设影响了EW测道2005年—2013年7月的长趋势变化形态,2009年11月以后观测数据基本上不可用)。因此本文主要分析该台1985年以后的地电阻率观测对台站附近及周围地

震的响应能力。

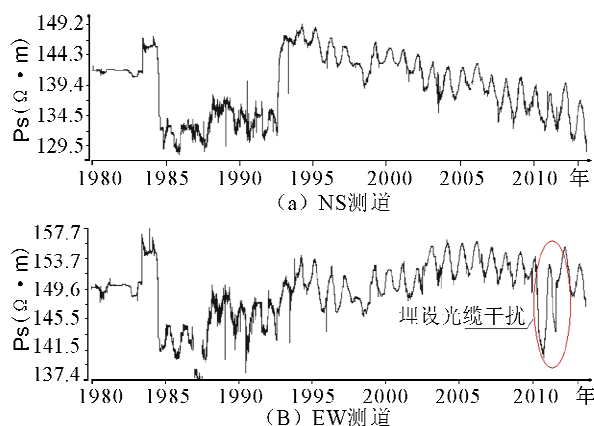


图3 宝昌台地电阻率日均值曲线

Fig. 3 The curves of daily mean value of geo-resistivity at Baochang station

1985—2006年晋冀蒙三省交界附近地区发生了14次 $M_s \geq 5.0$ 地震,距离在110~483 km范围内(图1)。其中最大地震是1996年5月3日包头 $M_s 6.4$ 地震,震中距483 km;最近距离的强震为1998年1月10日张北 $M_s 6.1$ 地震和1989年10月19日大同一阳高 $M_s 6.1$ 地震,震中距分别为120 km和249 km(表1)。

3 异常分析

3.1 归一化变化速率方法

常规的地电阻率数据处理方法是:在地电阻率原始观测数据或各类均值排除年变化后的地电阻率曲线上估算地电阻率相对变化 $\Delta\rho_s/\rho_s(\%)$ 。这种传统方法存在以下两个缺点:其一,由于背景变化较复杂,根据地电阻率变化的基值识别上升、下降等异常变化时,必然存在人为确定正常变化的基值和异常变化的随意性;其次,不同台站地下介质条件不同,介质电阻率对介质应力应变变化的响应不同,因此异常幅度随之不同,很难统一标准识别异常。为此,杜学彬等提出了归一化变化速率方法^[2,8](原称“月速率方法”^①),其数据处理的原理是:在地电阻率月均值等时间序列中,以固定的数据个数为步长 ξ 逐步滑动线性回归每个地电阻率月均值数据等子序列,计算出回归直线关于时间轴的斜率和回归直线的线性相关系数,再进行归一化处理。由于进行了归一化处理,其速率值是无量纲的。归一化变化速率法避免了人为判定正常背景变化基值和下降变

① 杜学彬,卢军,王志贤,等.地电中短期前兆识别、标志体系及预报方法研究.1999.

化、下降—上升交替变化、上升变化等异常变化的困难和随意性,同时保留了原地电阻率曲线的下降、上升等变化的形态,且排除了随机干扰引起的单点突跳的偶然异常。该方法用于处理地电阻率月均值提取中期~短期异常最有效,一般数据滑动步长 ζ 采用7~8个月(同一个台站的长期观测数据 ζ 相同),异常指标超过 ± 2.4 阈值视为异常(所有台站相

同)。在处理过程中,首先排除各类干扰(降雨、仪器和布极区环境变化等问题)对观测数据的影响,然后消除年变化成分,并分时段处理长趋势下降或上升变化时段的数据。实际上,长趋势变化发生转折、加速等过渡变化其异常是明显的,不需归一化变化速率方法提取异常变化。例如图3(a)中的1999、2005年等转折变化的异常本身已很明显了。

表1 地震基本参数表

Table 1 Basic parameters of the earthquakes

序号	时间	地点	$\lambda_N/(^{\circ})$	$\phi_N/(^{\circ})$	震级/ M_s	震中距/km
1	1985-06-21	苏尼特右旗	42.34	112.31	5.3	151
2	1986-09-09	阿巴嘎旗	45.12	114.57	5.6	369
3	1989-10-19	大同一阳高	39.92	113.91	6.1	246
4	1991-03-26	大同一阳高	40.00	113.80	5.8	245
5	1991-09-03	苏尼特右旗	43.30	112.40	5.4	320
6	1996-05-03	包头	40.80	109.60	6.4	483
7	1998-01-10	张北	41.10	114.30	6.1	120
8	1999-01-29	锡林浩特	44.70	115.70	5.2	310
9	1999-03-11	张北	41.20	114.40	5.6	111
10	1999-11-01	浑源	39.80	113.90	5.6	247
11	2002-10-20	西乌珠穆沁旗	44.90	117.00	5.0	247
12	2003-08-16	巴林左旗	43.90	119.70	5.9	436
13	2004-03-24	东乌珠穆沁旗	45.40	118.25	5.9	455
14	2006-07-04	文安	38.90	116.30	5.3	34

图4(a)是宝昌台1993—1999年两个测道地电阻率月均值归一化变化速率曲线。由图可见,在内蒙古包头 $M_s 6.4$ (483 km)和河北张北 $M_s 6.1/5.6$ ~山西浑源 $M_s 5.6$ 地震(震中距111~247 km)地震前出现了突出的下降异常。1998年1月张北 $M_s 6.1$ 地震距离宝昌台120 km、1999年3月张北 $M_s 5.6$ 地震距离该台111 km,两次地震震中距仅相差不到10 km,但 $M_s 6.1$ 地震前并未显示震前异常,震后在 $M_s 5.6$ 地震前出现明显周期下降—短期上升的异常。这个震例与1989年大同 $M_s 6.1$ 、1991年大同 $M_s 5.8$ 地震前震中区附近的阳原台(震中距仅分别为37 km和33 km)地电阻率变化非常相似^[9]。这种现象可能与主震、余震的震源机制以及震源断层破裂方向不同有直接联系^[9-10]。

图4(b)是宝昌台1999—2004年两个测道的地电阻率月均值归一化变化速率曲线。我们注意到:NS测道在2002年7—9月份出现了地电阻率下降异常,EW测道2002年9—12月份出现上升异常,两次异常都十分显著,异常出现的日期紧接2002年6月吉林汪清 $M_s 7.2$ 深震(1 263 km)和2002年3月我国台湾东北 $M_s 7.6$ 地震(1 963 km),异常结束后发生了2003年8月内蒙古巴林左旗 $M_s 5.9$ 地震(436 km),对 $M_s 5.9$ 地震而言属于中期异常。另

外,2001年的年中两个测道出现了地电阻率下降异常,但在出现本次异常的前后1年内距离宝昌台500 km范围内未发生 $M_s > 4.2$ 地震,从异常出现的时间上看十分对应2001年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大震(2 232 km)。实际上,上述第二种情况在地电阻率长期观测中是普遍出现的。杜学彬等^[2,11-12]研究了这种持续性的地电阻率异常对应远距离大震的情况,认为此类异常和大震发生是一种与地球自转年尺度加速有关的“同源异象”现象,异常与大震震源过程并未直接联系。实际上,对应昆仑山口西 $M_s 8.1$ 大震,我国绝大多数台站,包括远至东南沿海、东北的部分台站也零散地出现了持续性下降或上升的地电阻率异常。

图4(c)是宝昌台2005—2009年两个测道的地电阻率月均值归一化变化速率曲线。在此期间,该台周围500 km范围内仅发生了2006年文安 $M_s 5.1$ 地震;距离该台1 600 km多发生了2008年汶川 $M_s 8.0$ 地震,属于远距离大震。由图可见,文安 $M_s 5.1$ 地震的震级不大,震中位于该台以南的344 km处,但该台两个测道出现了突出的上升异常。此异常的变化形态非常吻合本次地震震中以北的北京通州台(129 km)、天津宝坻台(113 km)EW测道的地电阻率上升异常形态,异常出现的时间也基本

相同,只过后两个台距离震中近、上升异常的幅度大(图 5)。从这个意义上讲,尽管宝昌台供电极距小,但该台处于有利于本区及周围地震监测的构造部位,具有很强的地震监测能力。在远距离的汶川 $M_s 8.0$ 地震前该台 NS 测道也出现了突出的下降异常。在 2009 年初,宝昌台 EW 测道出现小幅度的上升异常,不对应附近地震,周边也未发生远距离大震,但在华北地区 2009 年初有多个台站出现下降或上升异常,目前还不清楚其原因。在 2009 年底,宝昌台受到网通公司光缆敷设钢绞线接地干扰,EW 测道干扰影响程度比 NS 测道明显,EW 测道出现了干扰引起的上升异常。

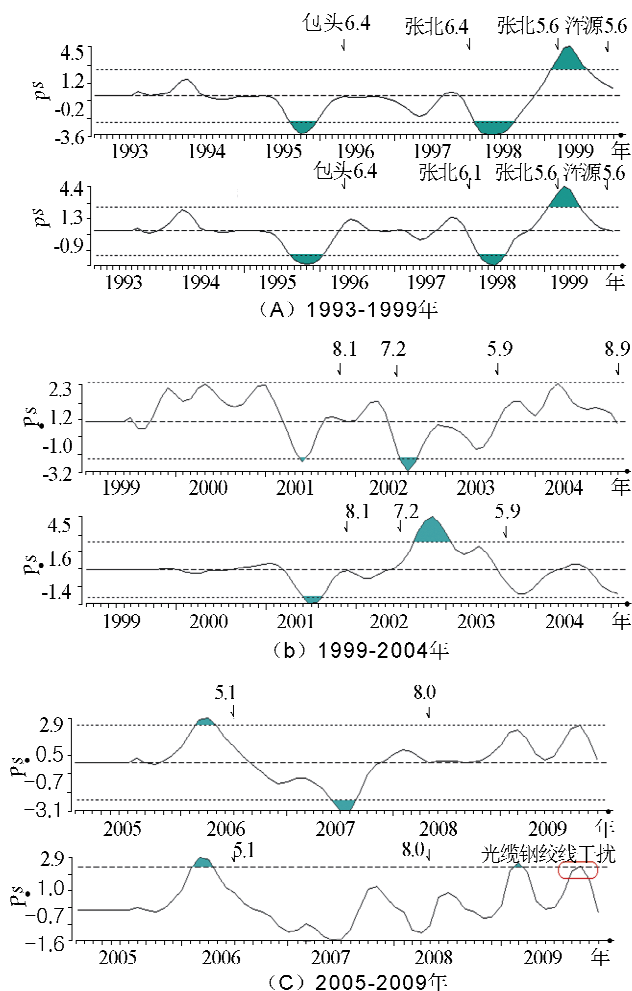


图 4 宝昌台地电阻率月均值归一化变化速率曲线
Fig. 4 The normalized variation rate curves of geo-resistivity monthly mean values at Baochang station

3.2 滑动傅氏分析

由图 3 可见,宝昌台 1985—1992 年的地电阻率数据质量不高,特别是 EW 测道 1986 年 12 月出现的阶跃式下降变化持续到 1987 年,相对变化幅度达

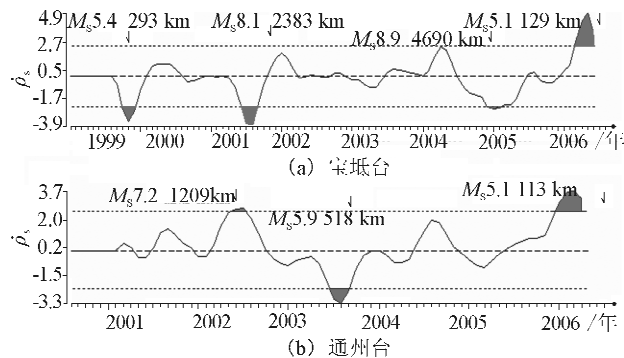


图 5 文安 $M_s 5.1$ 地震附近天津宝坻、北京通州台地电阻率月均值归一化变化速率曲线

Fig. 5 The curves of normalized variation rate of geo-resistivity at Baodi station in Tianjin(a) and Tongzhou station in Beijing(b)

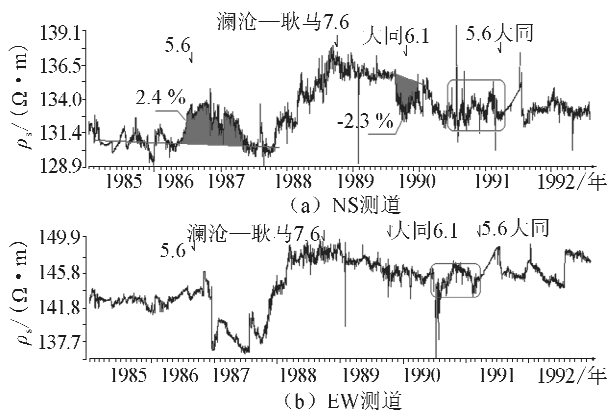


图 6 宝昌台电阻率日均值富氏滑动曲线

Fig. 6 The curves of daily mean value in geo-resistivity at Baodi station processed by Fourier method

到 -5.1% ,可能这个下降的异常变化属于观测问题引起的。因此对 1985—1992 年的观测数据只能进行经验性分析来评价映震效能,未用归一化变化速率方法。图 6 显示用富氏滑动方法排除年变化后的日均值曲线。富氏滑动方法^[13]是排除地电阻率观测数据中年变化的一种方法,可应用于日均值、五日均值和月均值时间序列的年变化消除,在“九五”期间发展为可用于消除地电阻率小时测值时间序列中的年变化成分^①。由图 6 可见,该台 NS 测道在 1986 年内蒙古阿巴嘎旗 $M_s 5.6$ 地震(369 km)和 1989 年山西大同 $M_s 6.1$ 地震(249 km)前后出现了幅度不大的地电阻率下降异常。此外在远距离的 1988 年云南澜沧—耿马 $M_s 7.6$ 地震(2 566 km)前

① 杜学彬,卢军,王志贤,等. 地电中短期前兆识别、标志体系及预报方法研究. 1999.

NS、EW 两个测道出现了大幅度的上升异常。然而,该台 NS、EW 两个测道在 1991 年山西大同—阳高 $M_s5.6$ 地震(245 km)前未出现明显、可识别的地电阻率持续性上升或下降异常,不过震前约半年的时间内出现了地电阻率急剧、交替型变化。

4 分析与讨论

4.1 地电阻率异常可靠性评价

宝昌地电阻率台站自 1980 年以来持续观测已有 35 年时间,在 2009 年 11 月份以前该台观测环境是比较好的,未受到观测环境的影响。2009 年 11 月—2011 年 7 月底该台存在埋地钢绞线和光缆的影响,特别对 EW 测道影响大,文献[14]对这个干扰的影响量做了很有意义的研究。2011 年 7 月底内蒙古地震局拆除了上述干扰影响,地电阻率测值基本恢复,但据文献[15]该台在拆除上述干扰之后依然存在地电阻率的日变化,EW 测道比 NS 测道明显得多。造成这个日变化的原因有以下可能:第一,该台地电阻率观测的极距小, $AB=560$ m,其探测深度/范围小,表层介质受昼夜温差、潮汐影响等引起地电阻率出现日变化。第二,2011 年 7 月拆除移动公司的地埋钢绞线、光缆后采用空间线,可能空架线悬挂钢绞线对地不绝缘引起地电阻率出现日变化。

从上述问题来看,该台 2009 年 11 月份以后的地电阻率观测数据质量不高,尽可能不用。但是,即便如此,宝昌台在其余时间段观测环境依然符合地电阻率观测的技术要求,长程观测数据是可靠的,对于评价该台地电阻率监测效能是可用的。从这个意义上讲,仅仅从地电阻率时间序列上识别异常来说,前文所讨论的时间上对应该台周围的中等地震和远距离大震的地电阻率异常是可信的。

4.2 地电阻率异常特征

总结该台长程的地电阻率观测数据对台站周围 500 km 范围内的 14 次中等地震的映震效能得到:该台地电阻率观测对台站周围的中等地震表现出了一定映震能力,但异常时空强表现也十分复杂。

(1) 在表 1 所示的 14 次地震中的 8 次地震前观测到了中期阶段或短期阶段的地电阻率异常,异常幅度大于人们长期总结的地电阻率异常指标(数字仪器异常指标下限不小于 1%,模拟仪器不小于 1.5%,归一化变化速率不小于 2.4)。例如,包头 $M_s6.4$ 、张北 $M_s5.6$ 、浑源 $M_s5.6$ 、文安 $M_s5.1$ 、大同 $M_s6.1/5.6$ 等 8 次地震前主要以震前中期阶段持续

性下降/上升为主的地电阻率异常。未观测到异常的地震包括西乌珠穆沁旗 $M_s5.0$ (351 km)、东乌珠穆沁旗 $M_s5.9$ (455 km)、苏尼特右旗 $M_s5.4$ (320 km)等 3 次远距离的中等地震。

(2) 存在台站周围近距离、大震级地震无异常,而远距离、小震级地震出现异常的现象。例如,1998 年 10 月张北 $M_s6.1$ 地震(120 km)前未出现异常,但在 1999 年 3 月张北 $M_s5.6$ 余震(111 km)和 1999 年 11 月浑源地震(247 km)前出现异常。2006 年文安 $M_s5.1$ 地震震中距已达 344 km,在这个远距离的小震级地震前出现了异常,且宝昌台两个测道的异常出现的时间、异常变化形态与文安地震附近的通州、宝坻台 EW 测道异常基本相同。

(3) 存在异常对应远距离大震活动对应远程相关性。例如,2001 年昆仑山口西 $M_s8.1$ (2 232 km)、2008 年汶川 $M_s8.0$ (1 608 km)、1988 年澜沧—耿马 $M_s7.6$ (2 566 km)和 2011 年日本 $M_s8.9$ (2 355 km)等大震前宝昌台均出现地电阻率异常,特别是前 3 次大震前宝昌台地电阻率变化相当突出。有趣的是:宝昌台 EW 测道在昆仑山口西 $M_s8.1$ 大震前的 2001 年 5—8 月出现显著下降异常,天津宝坻台 EW 测道在同年 6—9 月出现显著下降异常,异常出现的时间近似同步、下降形态类似。

文献[2]提出了在长期的地电阻率观测中存在两类异常变化。第一类变化是与地震震源孕育过程直接有关的地震前兆异常,地震前中期地电阻率前兆异常空间分布范围有以下显著特点^[4,10,16]:中等以上地震前地电阻率异常主要集中在距震中 400 km 的范围内;异常空间分布与震中区附近的活动构造有关,异常空间分布和幅度以及震前出现时间关联震中及周围的活动断层展布和活动;中期异常大多数为下降型异常。第二类变化的特点是^[2,11-12]:在中国大陆、大区域离散分布,并时间上同步或准同步的持续 1 年尺度时间的显著地电阻率异常,此类异常变化与大震、强震的震源过程无直接关系,但异常时空丛集现象对应中国大陆、大区域范围内的 5 级以上地震高活动水平和中国大陆以及周边远距离的 8 级大震活动。根据上述研究成果可以较清晰地认识与解释宝昌台在周围地震前的地电阻率中期、短期异常的特点以异常复杂性现象。宝昌台长期以来观测环境比较好(除了个别时段外),地电阻率异常变化表现出了明显的两类地电阻率变化的特点。

5 结论

(1) 宝昌地电台长期以来总体上观测环境符合地电阻率观测的技术要求、无可见的干扰源(除文中指出的个别时段外),是我国地电阻率台网中观测数据长期不受环境影响的台站之一,观测数据有地震科学研究和预测预报的价值,异常识别可信。

(2) 宝昌台地电阻率观测的两个正交测道的供电极距小,但地电阻率观测对台站周围的中等以上地震仍有一定的监测能力,属于映震能力强的台站之一。

(3) 宝昌台地电阻率异常变化展示了地震预报中的两类视电阻率变化的特点:对台站周围的中等以上地震表现出了与地震有关的震前持续性的地电阻率中期或短期异常的特征;同时,在中国大陆及周边发生的数次远距离8级大震前也纪录了持续1年尺度的地电阻率下降/上升异常,异常与大震的发生存在紧密的时间相关性。

参考文献(References)

- [1] 钱复业,赵玉林,黄燕妮,等. 视电阻率各向异性参量计算及地震前兆实例[J]. 地震学报,1996,18(4): 480-488.
QIAN Fu-ye, ZHAO Yu-lin, HUANG Yan-ni, et al. Anisotropic Parameters Calculation of Earth Resistivity and Seismic Precursory Examples[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 9(4): 617-627. (in Chinese)
- [2] 杜学彬. 地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学:D辑, 2010, 40(10): 1321-1330.
DU Xue-biao. Two Types of Changes in Apparent Resistivity in Earthquake Prediction[J]. Science China: D Series, 2011, 54(1): 145-156. (in Chinese)
- [3] 钱家栋,马钦忠,李佑彬. 汶川 $M_s8.0$ 地震前成都台NE测线视电阻率异常的进一步研究[J]. 地震学报, 2013, 35(1): 4-17.
QIAN Jia-dong, Ma Qin-zhong, Li Shao-nong. Further Study on the Anomalies in Apparent Resistivity in NE Configuration at Chengdu Station Associated with Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35(1): 4-17. (in Chinese)
- [4] 杜学彬,薛顺章,郝臻,等. 地电阻率中短期异常与地震的关系[J]. 地震学报, 2000, 22(4): 368-376.
DU Xue-bin, XUE Shun-zhang, HAO Zhen, et al. On the Relation of Moderate-short Term Anomaly of Earth Resistivity to Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2000, 22(4): 368-376. (in Chinese)
- [5] 杜学彬,李宁,叶青,等. 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, 2007, 50(6): 1802-1810.
DU Xue biao, Li Ning, Ye Qing, et al. A Possible Reason for the Anisotropic Changes in Apparent Resistivity Near the Fo-
- cal Region of Strong Earthquake[J]. Chinese J Geophys, 2007, 50(6): 1555-1565. (in Chinese)
- [6] 叶青,杜学彬,陈军营,等. 2003年大姚和民乐—山丹地震1年尺度预测[J]. 地震研究, 2005, 28(3): 226-230.
Ye Qing, DU Xue-biao, CHEN Jun-ying, et al. One-Year Prediction for the Dayao and Minle—Shandan Earthquakes in 2003[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(3): 226-230. (in Chinese)
- [7] 孙雷,李飞,杨冯威. 新沂台地电场频谱特征的分析与研究[J]. 华南地震, 2013, 33(2): 93-103.
SUN Lei, LI Fei, YANG Feng-wei. Spectrum Characteristics of the Geoelectrical Field in Xinyi Station[J]. South China Journal of Seismology, 2013, 33(2): 93-103. (in Chinese)
- [8] 杜学彬,阮爱国,范世宏,等. 强震近震中区视电阻率变化速率的各向异性[J]. 地震学报, 2001, 23(3): 289-297.
DU Xue biao, RUAN Ai guo, FAN Shi Hong, et al. Anisotropy of the Apparent Resistivity Variation Rate near the Epicentral Region for Strong Earthquakes[J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 14(3): 303-314. (in Chinese)
- [9] 杜学彬,马占虎,叶青,等. 与强地震有关的视电阻率各向异性变化[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 93-100.
DU Xue-biao, MA Zhan-hu, Ye Qing, et al. Anisotropic Changes in Earth Resistivity Associated with Strong Earthquakes[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(1): 93-100. (in Chinese)
- [10] 郑国磊,杜学彬,陈军营,等. 断层构造对地震地电阻率异常的影响[J]. 地震学报, 2011, 33(2): 187-197.
ZHENG Guo-lei, DU Xue-bin, CHEN Jun-ying, et al. Influence of Active Faults on Earthquake-related Anomalies of Geo-electric Resistivity[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(2): 187-197. (in Chinese)
- [11] 杜学彬,谭大诚. 地电阻率1年尺度异常时空丛集现象与地震活动性[J]. 中国地震, 2000, 16(3): 283-292.
DU Xue-bin, TAN Da-cheng. On the Temporal and Spatial Clusters of One-year Scale Anomalies of Earth—resistivity and the Relation to Seismicity[J]. Earthquake Research in China, 2000, 16(3): 283-292. (in Chinese)
- [12] 杜学彬,薛顺章,任广军. 中国大陆多种前兆异常研究及强震的尝试性预测[J]. 西北地震学报, 1999, 21(2): 113-122.
DU Xue-bin, XUE Shun-zhang, REN Guang-jun. Study on Many Kinds of Precursory Anomalies and Trial Prediction of Strong Earthquakes in the Continent of China[J]. Northwest-ern Seismological Journal, 1999, 21(2): 113-122. (in Chinese)
- [13] 赵跃辰,刘小伟. 一种消除年变的数据处理方法[G]//钱复业,赵玉林,陈英方. 主编. 地震预测——地电方法论文集. 福州:福建科学技术出版社, 1985: 139-144.
ZHAO Yue-chen, LIU Xiao-wei. A Data Processing Method to Eliminate the Annual Variation in Apparent Resistivity [G]//Earthquake Prediction—Conference Proceeding of Geo-electrical Method. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1985: 139-144. (in Chinese)
- [14] 解滔,卢军,李美,等. 地理钢缆对宝昌台地电阻率干扰的定

- 量分析[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 727-734.
- XIE Tao, LU Jun, LI Mei, et al. Quantitative Analysis of Disturbance Caused by Burned Wirecable in Baochang Geoelectric Resistivity Station[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 727-734. (in Chinese)
- [15] 戴勇, 高立新, 高昌志, 等. 宝昌台地电阻率变化特征[J]. 地震研究, 2013, 36(3): 358-363.
- DAI Yong, GAO Li-xin, GAO Chang-zhi, et al. Variation Characteristic of Earth Resistivity at Baochang Station[J]. Journal of Seismological Research, 2013, 36(3): 358-363. (in Chinese)
- [16] DU Xue-biao, ZHAO H Y, Chen B Z, et al. On the Relation of Imminent Sudden in Earth Resistivity to the Active Fault and Generating-earthquake Stress Field[J]. Acta Seismologica Sinica, 1993, 6(3): 663-673.
- *****
- (上接 386 页)
- [30] 张彬, 刘耀炜, 杨选辉. 中国大陆井水温对汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级和岷县 6.6 级地震响应特征的对比研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(3): 535-541.
- ZHANG Bin, LIU Yao-wei, YANG Xuan-hui. Contrastive Study on Co-seismic Response Characteristics of Well Water Temperature in Wenchuan (M8.0), Yushu (M7.1), Lushan (M7.0) and Minxian (M6.6) Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 535-541. (in Chinese)
- [31] 常宝琦. 水库诱发地震的预测[J]. 华南地震, 1984, 4(4): 94-106.
- CHANG Bao-qi. Prediction to Reservoir Induced Earthquake[J]. South China Journal of Seismology, 1984, 4(4): 94-106. (in Chinese)
- [32] 秦嘉政, 刘丽芳, 钱晓东. 水库诱发地震活动特征及其预测方法研究[J]. 地震研究, 2009, 32(4): 105-113.
- QIN Jia-zheng, LIU Li-fang, QIAN Xiao-dong. Research on Characteristics and Prediction of Reservoir Induced Seismicity[J]. Journal of Seismological Research, 2009, 32(4): 105-113. (in Chinese)
- [33] 马文涛, 徐锡伟, 于贵华, 等. 使用灰色聚类方法评估长江三峡水库湖北不同库段水库诱发地震的震级上限[J]. 地震地质, 2012, 34(4): 726-738.
- MA Wen-tao, XU Xi-wei, YU Gui-hua, et al. Evaluation of the Maximum Magnitude of Reservoir Induced Earthquake in Different Segment of Hubei According to Grey Clustering Method[J]. Seismology and Geology, 2012, 34(4): 726-738. (in Chinese)
- [34] 胡毓良. 从新丰江水库诱发地震研究工作得到的启示[J]. 地震地质, 2013, 35(1): 188-190.
- HU Yu-liang. Lessons from Xinfengjiang Reservoir Induced Earthquake Research Work[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(1): 188-190. (in Chinese)