第 37 卷 第 3 期
2015 年 9 月

地 震 工 程 学 报
CHINA EARTHQUAKE ENGINEERING JOURNAL

Vol. 37 No.3
Sept., 2015

北京市延庆地震台地电阻率长程观测数据研究①

闫 睿[1], 朱石军[1], 胡乐银[1], 崔腾发[2]

(1.北京市地震局,北京 100080; 2.中国地震局兰州地震研究所,甘肃 兰州 730000)

摘要:分析北京延庆台 1988 年以来地电阻率观测资料的可靠性,讨论归一化变化速率方法,用以处理该台地电阻率长程观测数据;结合北京及邻近地区近三十年来发生的 7 次中强地震,研究该台地电阻率异常与地震的对应关系。结果表明:延庆台地电阻率观测对附近的中等以上地震和远距离大震有一定的映震能力,可为今后该台附近及邻近地区的地震提供中、短期预测预报参考依据;同时该台在中国大陆及周边远距离大震前也观测到了时间上对应的地电阻率异常。

关键词: 延庆台; 地电阻率; 异常; 地震

中图分类号:P319.3 **文献标志码**:A **文章编号**: 1000－0844(2015)03－0739－07

DOI:10.3969/j.issn.1000－0844.2015.03.0739

Long-term Observation Data of Geo-electrical Resistivity at the Yanqing Station, Beijing

YAN Rui[1], ZHU Shi-jun[1], HU Le-yin[1], CUI Teng-fa[2]

(1.*Earthquake Administration of Beijing Municipality*, *Beijing* 100080, *China*;
2.*Lanzhou Institute of Seismology*, *CEA*, *Lanzhou* 730000, *Gansu*, *China*)

Abstract: The Yanqing station in Beijing has observed geo-electrical resistivity for almost 30 years. This station started observing the Geo-electrical resistivity in 1969 and a technological transformation of this observation site occurred in 1988. The station has roughly conducted normal observations since 1988. However, some environmental interference has occasionally occurred in the station's electrode-arranging region. This station is one of the few stations affected by environmental interference in the Beijing, Tianjin, and Tangshan areas. The quality of geo-electrical resistivity observation data has had relatively high standards for a long time. The reliability of geo-electrical resistivity observations since 1988 at the Yanqing station was analyzed. The normalized variation rate method was applied to process long-range geo-electrical resistivity observations. Data from seven medium or strong earthquakes that occurred near Beijing were integrated to study the relationship between geo-electrical resistivity and earthquakes. The results showed that the abnormal changes in geo-electrical resistivity observations demonstrated two characteristics of apparent resistivity changes. The first characteristic was an observation that appeared for a medium or short period and abnormal changes continued before the medium earthquakes occurred. The second characteristic was observed as an observation that had a long term of about 1 year and continued to have higher or lower abnormal changes before strong earthquakes occurred. This revealed a compact temporal correlation between the abnormal changes and strong earthquakes. The geo-electrical resistivity observation at the Yanqing station has the ability to reflect strong earth-

① **收稿日期**:2014-10-20
金基项目:国家自然科学基金(41374080)
作者简介:闫 睿(1980－),女,工程师,主要从事地震信息网络、地震监测与研究工作。E-mail:yanrui@bjseis.gov.cn。

quakes near the station. Therefore, the observations provide a frame of reference for long-term or short-term earthquake prediction in nearby areas. In addition, the geo-electrical resistivity observations changed abnormal while strong earthquakes were occurring at long distances from the station in or around China. This showed that the geo-electrical resistivity observation at the Yanqing station can also be used to study earthquake prediction over long distances. The normalized variation rate method was applied to process the monthly observations of geo-electrical resistivity. This is an effective method to extract long-term or short-term geo-electrical resistivity data for abnormal changes. The abnormal changes that cannot be identified from the monthly data series can also be easily discovered through this normalized variation rate process.

Key words: Yanqing seismic station; geo-electrical resistivity; anomaly; earthquake

0　引言

1966 年河北省邢台地震后，我国先后建立了 100 多个地电阻率台站。半个世纪以来在地电台网控制范围内发生了多次强震和中强震，积累了丰富的地电阻率基础观测资料，记录了大量的对应地震的明显异常。例如，1976 年唐山 M_S7.8 地震、1988 年松潘—平武 M_S7.2 地震、1988 年澜沧—耿马 M_S7.6/7.2 地震、2008 年汶川 M_S8.0 地震前，附近台站分别记录了显著的地电阻率异常[1-7]，同时利用地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[8-9]。因地震前兆异常存在复杂性、多样性，不同地区，即使同一地区的同等震级地震在震前电阻率的异常变化也存在差异[3-4]，这无疑对地震前兆资料的分析和研究提出了进一步的要求。

北京市延庆地震台自 1988 年改造以来地电阻率观测至今已近 30 年，属于京津唐地区观测环境长期符合地电阻率观测技术要求的台站，且台站周围发生了多次中等地震。本文通过对延庆台长程地电阻率观测数据的处理分析，研究地电阻率变化与地震的对应关系。一方面是进一步总结地震前地电阻率异常，另一方面为今后应用该台观测资料分析研判该区地震活动趋势提供参考。

1　延庆台地电阻率观测概况

延庆地电阻率台位于北京市延庆县城关镇张庄村南，海拔 484 m，是首都圈地区地震重点监测台站。台站位于延、怀盆地的北部边缘，燕山沉降带西北部，东、北两面环山，山前地势平坦，由东北向西南延伸，东西长 35 km，南北宽 16 km。布极区为平坦的农田，地质构造上属于燕山褶皱带。狼山—黄柏寺断裂距台站西北 5 km，第四系厚度 329 m，下伏侏罗纪火成岩，为电性低阻层，厚度 175 m。

延庆地电阻率台站始建于 1969 年，1988 年改造后再次投入地电阻率观测。采用正南北、正东西方向的对称四级电阻率观测装置，极距 AB 为 1 500 m，MN 为 500 m（图 1），观测仪器先后使用 ZD8B 系列仪器[10]。台站观测装置、测量仪器、外线路和电极等符合地电阻率台站观测的技术要求[11-14]。测区内为开阔平坦的农田，无山川、河流，也没有大型的厂矿、公路、高压线路干扰。2000—2003 年测区内建养鸡场等造成了短时持续、幅度不大的地电阻率变化，但变化形态与以前不同。2003 年 11 月对台站进行改造后，EW 向和 NS 向的观测资料质量得到不同程度的提高，NS 向的数据比 EW 向离散度更小、精度更高。2011 年对台站外线路、电极以及观测仪器进行了改造。

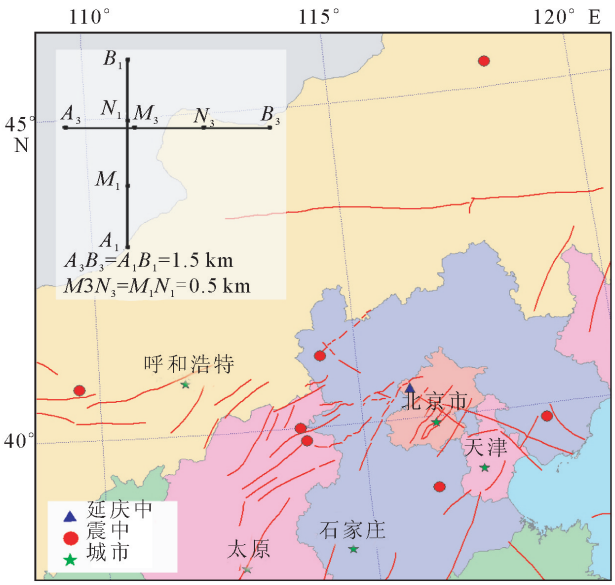

图 1　延庆地震台地电阻率观测布极

Fig.1　Electrode layout of geo-electrical resistivity at Yanqing station

2　观测资料和台站附近地震

图2是延庆台自运行观测以来的地电阻率月

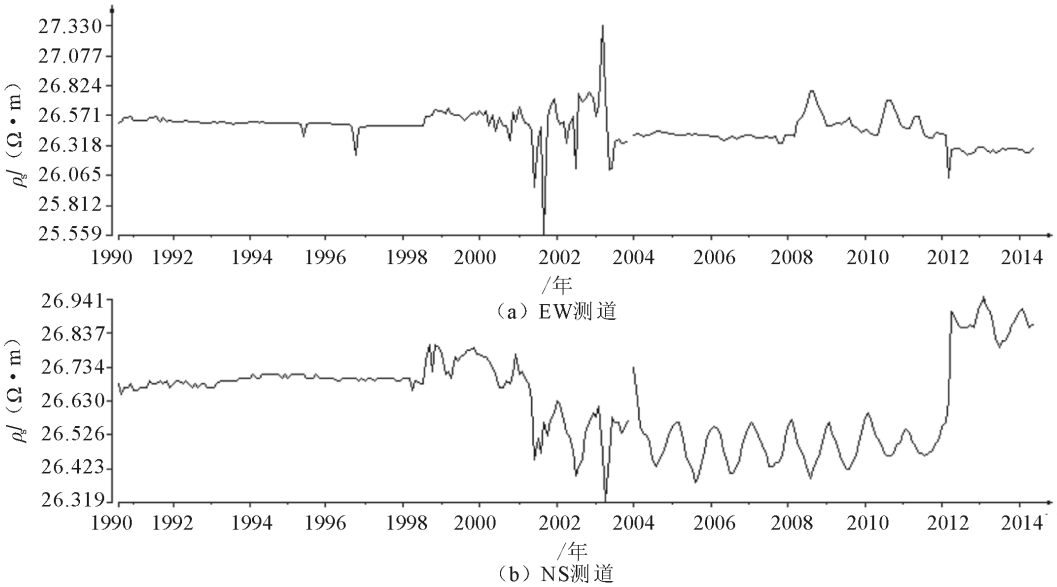

图 2 延庆台 EW 测道、NS 测道地电阻率月均值曲线

Fig.2 Monthly mean value series of geo-electrical resistivity in EW and NS directions at Yanqing station

均值曲线(1990 年 8 月—2014 年 6 月)。期间受到布极区内的环境干扰影响、外线路改造等造成的数据不连续等影响,所以对上述期间的观测数据进行分段处理。

自 1991—2006 年华北地区发生 6 次 $M_S \geqslant 5.0$ 地震,距台站 154～529 km 范围内。其中 1996 年 5 月 3 日包头 $M_S6.4$ 是该区最大地震,震中距 529 km;较近强震为 1998 年 1 月 10 日河北尚义 $M_S6.2$ 地震,震中距 154 km(表 1)。

表 1 延庆地震台邻近地区地震基本参数表

Table 1 Basic parameters for earthquakes in neighboring areas of Yanqing seismic station

序号	时间	地点	纬度 /(°)	经度 /(°)	震级 /M	震中距 /km
1	1991-03-26	山西大同	40.00	113.80	5.8	186
2	1995-10-06	河北唐山市古冶	39.80	118.50	5.0	222
3	1996-05-03	内蒙包头、固阳一带	40.80	109.60	6.4	529
4	1998-01-10	河北尚义东	41.10	114.30	6.2	154
5	1999-11-01	山西浑源-河北阳原	39.80	113.90	5.6	182
6	2004-03-24	内蒙东、西乌珠穆沁旗	49.32	118.37	5.9	577
7	2006-07-04	河北文安	38.90	116.30	5.1	176

3 数据处理方法

地电观测中常用的形态、幅度跟踪异常需要判定正常的变化基值,再根据基值来识别下降、上升等变化,但基值往往很难判定,因而判定下降、上升等变化存在人为性。另一方面,由于不同地电台测区介质特征不同,其地电阻率变化对测区介质物理条件变化的敏感程度不同。因此,杜学彬等[10-11,13]提出了归一化月速率方法,目的就是为了克服上述不利因素。其数据处理的原理是:在地电阻率月均值等时间序列中,以数据个数为步长 ζ 组成地电阻率月均值数据的子序列进行线性回归,然后计算出回归直线关于时间轴的斜率 K_i 和相关系数 R_i,由 $K_i \times R_i$ 组成子序列的初始变化速率。固定步长 ζ 逐点滑动计算初始变化速率,构成初始变化速率的时间序列,再对初始变化速率进行归一化处理得到变化速率时间序列,其每个元素都是无量纲的。该方法是从地电阻率观测数据中提取中期、短期异常的一种有效方法。一般滑动步长 ζ 采用 8 个月(同一个台站的长程观测数据 ζ 相同),少数情况下采用 7 个月或 9 个月,异常指标为达到±2.4 阈值视为异常(所有台站和测道异常阈值是相同的)。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,如果存在年变化成分、趋势上升或下降变化,则消除这些变化成分;其次按长趋势下降或上升变化的时段分段处理数据。归一化变化速率方法避免了人为判定基值和上升、下降等异常变化的困难和随意性,且保留了原有曲线的下降、上升等异常变化的形态,对所有台站识别异常与正常的标准统一。

4 地震前后地电阻率异常变化分析

图 3 是延庆台 NS、EW 两个测道的地电阻率月均值曲线和归一化变化速率曲线。由图 3(a)可见,1998 年 1 月河北省尚义发生 $M_S6.2$ 地震前(震中距

154 km)，视电阻率出现了十分微弱的下降变化，且异常变化过程清晰；1991 年山西大同发生 M_S5.8 地震(震中距 186 km)，1989—1990 年电阻率上升变化明显(由于 1989 年的变化幅度大，压制了曲线正常变化动态，所以未示 1998 年曲线)。图 3(b)是对应图 3(a)的归一化变化速率曲线，由图可见：1998 年张北 M_S6.2 地震前归一化变化速率为中期负异常(指示地电阻率下降变化)、短期正异常(指示地电阻率上升变化)相当明显；但 1995 年河北省唐山市古冶 M_S5.0 地震(震中距 222 km)、1996 年内蒙古包头 M_S6.2 地震(震中距 529 km)及 1991 年大同 M_S5.8 地震前未观测到地电阻率异常，其原因是归一化变化速率方法处理数据时在地电阻率时间序列最前段的 ζ 个数据无法计算变化速率而赋予“0 值”造成的，但图 3(a)中对应时段上升形态的异常变化还是较明显的；另外，1991 年出现变化速率正异常，对照图 3(a)可知是大同 M_S5.8 地震地电阻率上升异常造成的，1993 年底至 1994 年初出现变化速率正异常，出现异常前后该台附近及周围 600 km 范围内未发生 M_S>5.0 地震，但台湾海峡发生 M_S7.3 地震，表现了大空间尺度的异常与地震对应关系。图 3(c)是该台 EW 测道地电阻率归一化变化速率曲线，由图可见：1995 年唐山古冶 M_S5.0(222 km)、内蒙古包头 M_S6.4 地震(529 km)前出现明显的归一化变化速率负异常，出现异常的时间与地震发生时间相当对应；1998 年 6－7 月出现显著的归一化变化速率负异常(7 月后地电阻率发生特别大的变化，可能是台站观测装置变化引起的，所以此后的数据未标示)，随之于 1999 年 11 月发生山西浑源－河北阳原 M_S5.4 地震，震中距 182 km。

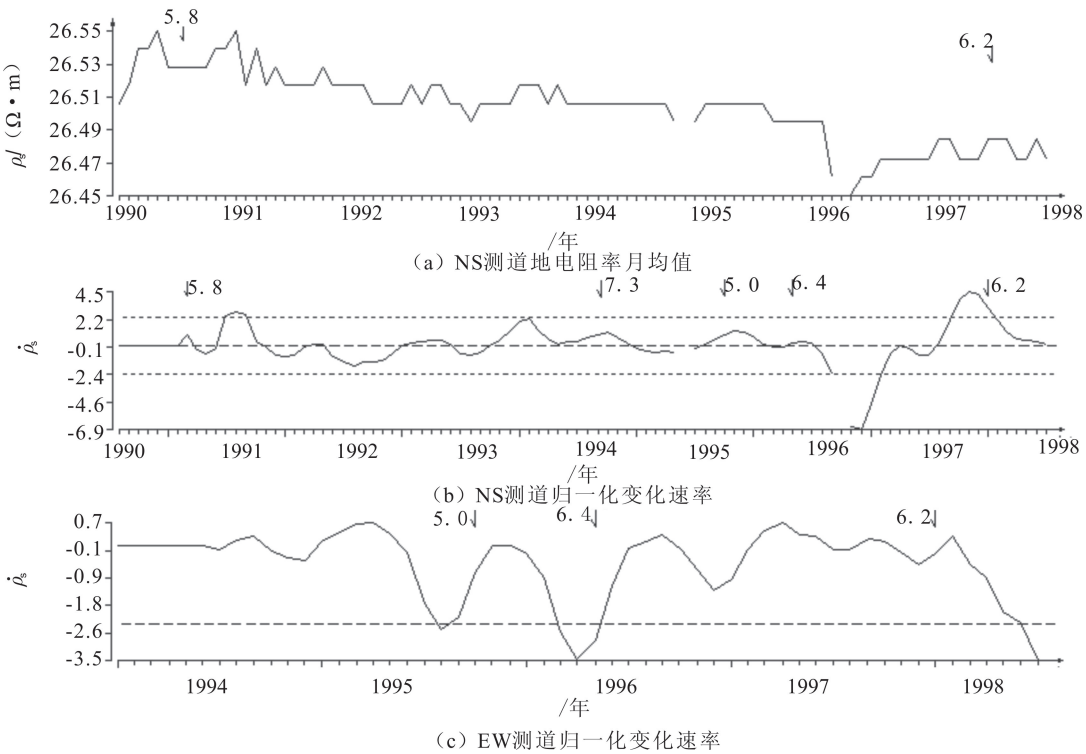

图 3　延庆台 NS、EW 两测道地电阻率月均值曲线及归一化变化速率

Fig.3　Monthly mean value series and normalized variation rate series of geo-electrical resistivity in NS and EW directions at Yanqing station

图 4 是延庆台 1998 年 1 月—2003 年 11 月 EW、NS 两个测道地电阻率归一化变化速率曲线。在此时段内，视电阻率月均值曲线的变化形态与以往明显不同[(图 2(a)]，所以分段处理这个期间的数据。从图 4(a)看出，1999 年山西浑源—河北阳原 M_S5.4 地震(182 km)前，EW、NS 两个测道均出现了幅度不大的归一化变化速率正异常[(图 3(c)中 1998 年 6－7 月的异常因归一化变化速率曲线最初 ζ 个值赋“0 值”而淹没]。2001 年 6－12 月，EW、NS 两个测道出现了负、正异常，紧接着 2001 年 11 月在昆仑山口西发生 M_S8.1 地震(2 268 km)。2003 年 11 月台站更换观测装置，但在之前的 8－11 月两个测道出现了大幅度的归一化变化速率负、正异常，2004 年 3 月 24 日在内蒙东、西乌珠穆沁旗发

生 M_S5.9 地震(577 km)。

图 5 是延庆台 2004 年 1 月—2012 年 2 月期间 EW、NS 两个测道地电阻率归一化变化速率曲线。由图 5(a)难以识别异常,但由图 5(b)～(c)归一化变化速率曲线可见,在 2008 年四川汶川 M_S8.0 (1 542 km)、2010 年青海玉树 M_S7.1(1 893 km)和 2011 年日本 M_S 8.9 地震(2 301 km)等远距离大震前负或正异常相当突出,时间上对应;同时在 2006 年河北文安 M_S5.1 地震(176 km)前的 6 月出现负异常。

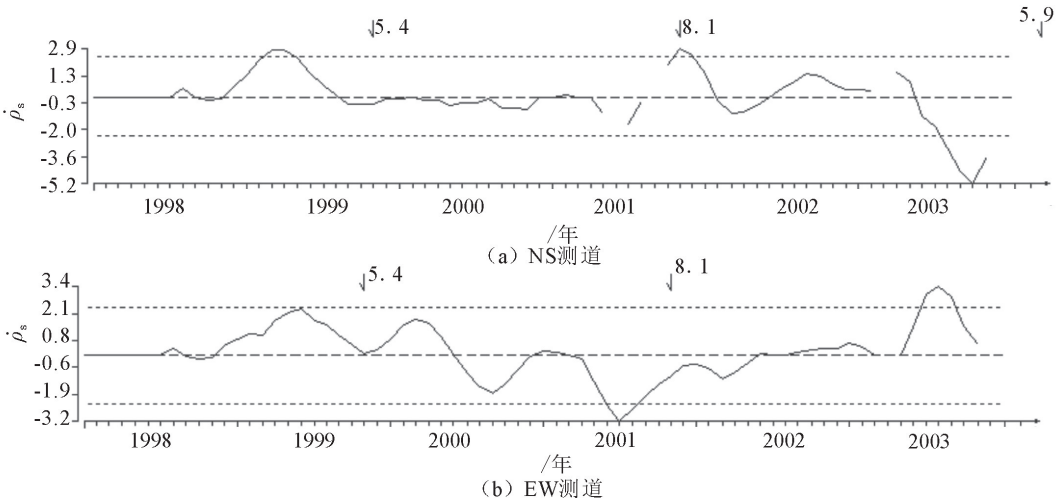

图 4 延庆台 NS 和 EW 测道地电阻率月均值归一化变化率曲线

Fig.4 Monthly mean normalized variation rate series of geo-electrical resistivity in NS and EW directions at Yanqing stations

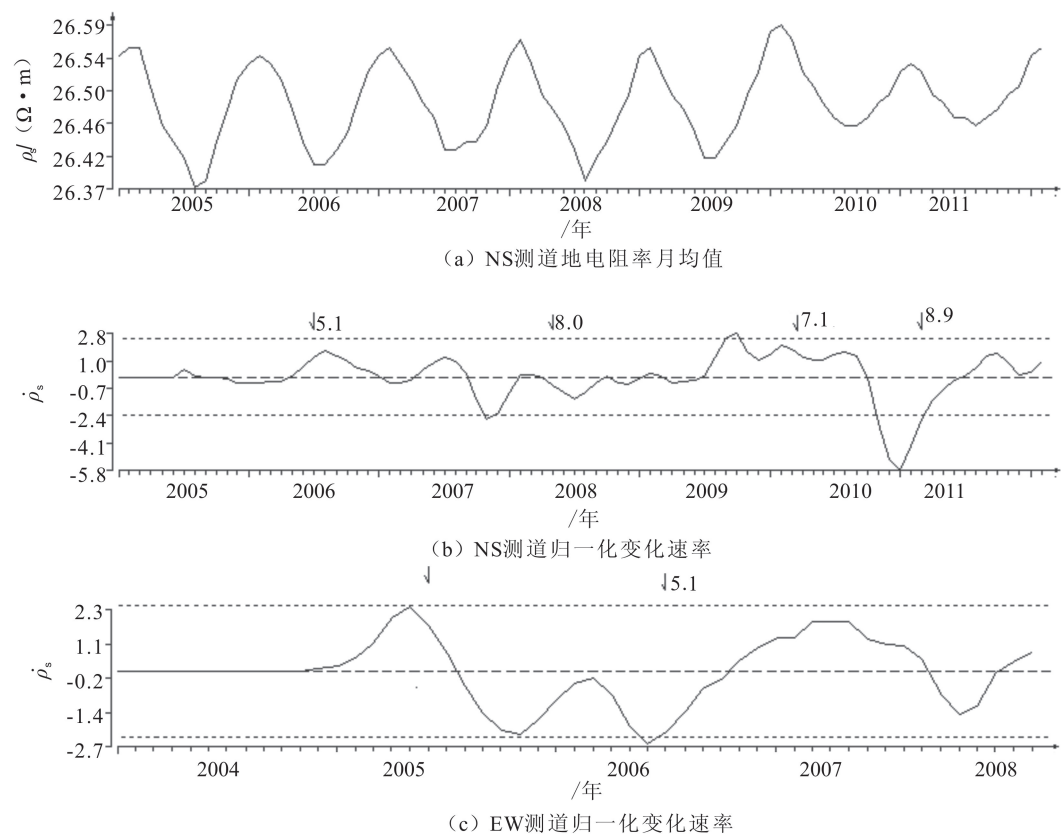

图 5 延庆台 NS、EW 测道地电阻率月均值及归一化变化速率曲线

Fig.5 Monthly mean value and normalized variation rate series of geo-electrical resistivity in NS and EW directions at Yanqing station

5　延庆台地电阻率异常评价及映震效能

5.1　异常可靠性评价

延庆台自 1988 年以来一直持续观测地电阻率，在 2000 年以前该台观测环境较好，2001－2003 年受养鸡场影响及改造影响，观测数据质量不高，此后数次改造也影响到观测数据的连续性，但从月均值曲线看这些干扰影响是持续时间短的偶然影响，且幅度远小于 1%的异常识别指标。归一化变化速率方法处理数据是计算每组 ζ 个连续数据的变化速率，反应电阻率数据的整体下降或上升变化，且在计算变化速率方法中用线性回归的相关系数 R 抑制个别“奇异”数据的偶然影响，很大程度上克服了短时持续的偶然干扰的影响[3,15-16]。另一方面，归一化变化速率异常是地震前中期、短期阶段的持续性异常。从这三个方面来讲，上述讨论中时间上明显对应该台周围中等地震和远距离大震前的归一化变化速率异常是可信的。

2006 年河北文安 M_S5.1 地震震级小，在图 5(c)中 2006 年 6 月(地震发生前 1 个月)出现了归一化变化速率负异常，幅度并不大，略超过异常阈值±2.4，但其负异常是可信的。事实上，尽管该地震震级小，但在震前首都圈附近多个台站观测到了地电阻率中期-短期异常。图 6 分别是京津唐地区天津宝坻台[图 6(a)]、北京通州台[图 6(b)]归一化变化速率曲线。这两个台距离近，且距震中分别为 129 km、113 km，其 EW 测道归一化变化速率出现几乎同步的正异常，异常变化形态、起始时间十分相似。这两个台的异常证明了延庆台 EW 测道出现的归一化变化速率负异常的可信性。同时，宝坻、通州台地电阻率观测发现，在远距离的昆仑山口西 M_S8.1(2001)地震之前，及山西浑源—河北阳原 M_S5.4(1999)和内蒙东、西乌珠穆沁旗 M_S5.9(2003)地震前也出现了类似延庆台的归一化变化速率正、负异常，这些都说明延庆台地电阻率归一化变化速率异常是可信的。

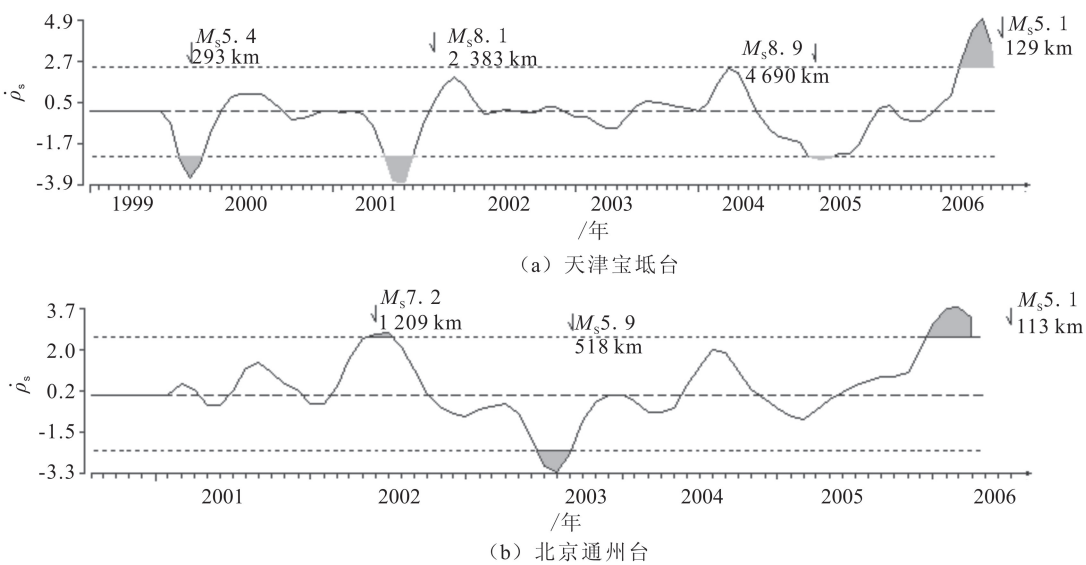

图 6　天津宝坻台和北京通州台 EW 测道地电阻率月均值归一化变化速率曲线

Fig.6　Monthly mean normalized variation rate series of geo-electrical resistivity in EW direction at Baodi station in Tianjin and Tongzhou station in Beijing

5.2　映震效能评价

上述地震地电阻率异常变化的分析和总结说明延庆台是京津唐地区地震监测能力强的台站。表 1 列出了 1991 年以来距离台站 600 km 范围内的 7 次地震前，在归一化变化速率曲线上均出现的中期或短期异常，表明该台对本区及周围中等地震具有很强的监测能力。同时也注意到，在上述 7 次中等地震前有的是两个测道均出现异常但幅度大小并不一致，有的是其中一个测道出现了异常，表现了震前地电阻率的各向异性变化[3]。

该台在四川汶川 M_S8.0(2008)、青海玉树 M_S7.1(2010)、日本 M_S8.9(2011)等数次远距离大震前出现了明显异常。据文献[3]，在中国大陆普遍出现与大陆及周边远距离大震对应的异常时空丛集现象，此类异常与所对应的地震震源过程并无直接联

系，可能是与地球自转年尺度加速有关的“同源异象”现象。总而言之，该台在长程地电阻率观测中记录了这种自然现象。

6 结论

（1）延庆地电台长期以来观测环境总体上符合地电阻率观测的技术要求，是我国地电阻率台网中观测数据长期不受环境影响或受环境影响小的台站之一，其观测数据有地震科学研究和地震预测预报的应用价值。今后可通过开展井下地电阻率观测[17]来抑制该台个别时段的地表环境干扰。

（2）延庆台地电阻率异常变化展示了地震预报中两类视电阻率变化的特点：第一类是对台站周围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；第二类是在中国大陆及周边发生的数次远距离大震前纪录了持续约1年尺度的地电阻率下降或上升异常，异常与大震的发生存在紧密的时间相关性。

（3）延庆台均记录了1991年以来京津唐地区及周围发生的7次 M_S5.0～6.4 地震对应的地电阻率中期异常或短期异常，属于京津唐地区地震监测能力强的台站。该台地电阻率观测对今后该区及周围地震有特定的地震监测、预测预报价值。今后需要特别注意维护该台的地电阻率观测环境和台站观测系统的正常运行，以保障台站观测数据的连续性和可靠性。

（4）应用归一化变化速率方法处理延庆台地电阻率月均值数据表明，该方法是提取震前中期、短期地电阻率异常的有效方法，对在地电阻率月均值曲线上不能识别的异常，用归一化变化速率方法的处理结果展示了该方法明显的异常分辨能力。

参考文献(References)

[1] 桂燮泰，关华平，戴经安，等.唐山、松潘地震前视电阻率短临异常图象重现性[J].西北地震学报，1989，11(4)：71-75.
GUI Xie-tai，GUAN Hua-ping，DAI Jing-an. The Short-term and Immediate Anomalous Pattern Recurrences of the Apparent Resistivity before the Tangshan and Songpan Earthquake of 1976[J]. Northwestern Seismological Journal，1989，11(4)：71-75.(in Chinese).

[2] 钱复业，赵玉林，于谋明，等.地震前地电阻率的异常变化[J].中国科学：B辑(化学)，1982(9)：831-839.
QIAN Fu-ye，ZHAO Yu-lin，YU Mu-ming，et al.Geo-resistivity Anomaly before Earthquake[J]. Sci China：Series B (Chamica Sci)，1982(9)：831-839.(in Chinese)

[3] 杜学彬.在地震预报中的两类视电阻率变化[J].中国科学：D辑(地球科学)，2010，40(10)：1321-1330.
DU Xue-bin. Two Types of Changes in Apparent Resistivity in Earthquake Prediction[J]. Sci China：Series D (Earth Sci)，2010，40(10)：1321-1330.(in Chisese)

[4] 杜学彬，任广军，薛顺章.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，REN Guang-jun，XUE Shun-zhuang. Study on Many Kinds of Precursory Anomalies and Trial Prediction of Strong Earthquake in the Continent of China[J]. Northwestern Seismological Journal，1999，21(2)：113-122.(in Chinese)

[5] 朱涛. 汶川 M_S8.0 地震前区域性视电阻率异常初步研究[J].地震学报，2013，35(1)：18-25.
ZHU Tao. Preliminary Study on Regional Geo-resistivity Anomaly before the Wenchuan M_S8.0 Earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica，2013，35(1)：18-25.(in Chinese)

[6] Huang Q H. Retrospective Investigation of Geophysical Data Possibly Associated with the M_S8.0 Wenchuan Earthquake in Sichuan，China[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2011，41(4-5)：421-427.

[7] 刘君，杜学彬，范莹莹，等.甘肃岷县漳县 M_S6.6 地震前的地电阻率变化[J].地震工程学报，2013，35(4)：819-826.
LIU Jun，DU Xue-bin，FAN Ying-ying，et al. The Geo-electrical Resistivity Anomaly before the the Minxian－Zhangxian M_S6.6 Earthquake in Gansu[J]. China Earthquake Engineering Journal，2013，35(4)：819-826.(in Chinese)

[8] 杜学彬，严玲琴，范莹莹，等.2013 年岷县漳县 M_S6.6 地震前/后地电观测引起的思考[J].地震工程学报，2013，35(3)：513-521.
DU Xue-bin，YAN Ling-qin，FAN Ying-ying，et al. Geo-electrical Forecasting and Observation Prior to and Following the M_S6.6 Minxian－Zhangxian Earthquake of 2003[J]. China Earthquake Engineering Journal，2013，35(3)：513-521.(in Chinese).

[9] 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-bin，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).

[10] 朱石军，张慧霞，陈莹，等.延庆地震台地电阻率改造影响的分析研究[J].地震地磁观测与研究，2008，29(6)：83-87.
ZHU Shi-jun，ZHANG Hui-xia，CHEN Ying，et al. Research of Reconstruction Impact on Earth Resistivity Observation in Yanqing Seismic Station[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research，2008，29(6)：83-87.(in Chinese).

[11] 中国地震局.地震及前兆数字观测技术规范——电磁观测(试行)[M].北京：地震出版社，2001：5-6，19-46.
China Earthquake Administration. Technical Specification for Digital Observation of Seismology and Precursor——Electromagnetic Observation (Trial Implementation)[M]. Beijing：Seismological Press，China，2001：5-6，19-46.(in Chinese).

（下转 771 页）

参考文献(References

[1] 袁晓铭.地表下圆形夹塞区出平面散身射地面运动的影响[J].地球物理学报，1996，39(3)：373-381.
YUAN Xiao-ming.Effect of a Circular Underground Inclusion on Surface Motion under Incident Plane SH Waves[J].Acta Geophysica Sinica，1996，39(3)：373-381.(in Chinese)

[2] 袁晓铭，孙锐.饱和砂土透镜体液化对建筑物地震反应的影响[J].地震工程与工程振动，2000，20(1)：68-74.
YUAN Xiao-ming，SUN Rui.Effect of Liquefaction of Lenticular Saturated Sand Zone on Seismic Response of Buildings[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2000，20(1)：68-74.(in Chinese)

[3] 梁建文，张炳政，巴振宁.层状场地中透镜体对地震动影响的基本规律[J].地震工程与工程振动，2009.29(5)：1-12.
LIANG Jian-wen，ZHANG Bing-zheng，BA Zhen-ning.On the Effect of a Lenticle in a Layered Site on Ground Motion[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2009，29(5)：1-12.(in Chinese)

[4] 梁建文，张炳政，巴振宁.基岩上均匀场地中透镜体对地震动的非线性放大作用[J].地震工程与工程振动，2009，29(6)：13-24.
LIANG Jian-wen，ZHANG Bing-zheng，BA Zhen-ning.Nonlinear Amplification of Ground Motion by a Lenticle in Single Layer on Bedrock[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2009，29(6)：13-24.(in Chinese)

[5] Moeen-Vaziri N，Trifunac M D.Scattering and Diffraction of Plane SH-waves by Two-dimensional Inhomogeneities[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering，1988，7：179-188.

[6] Pao Y H，Mow C C.Diffraction of Elastic Waves and Dynamic Stress Concentrations[M].New York：Crane Russak and Company Inc，1973.

(上接 730 页)

[12] 钱家栋，赵家骝，杜学彬，等.地震观测仪器进网技术要求 地电观测仪 第 1 部分：直流地电阻率仪[M].北京：地震出版社，2008，DB/T 29.1-2008.
QIAN Jia- dong，ZHAO Jia-liu，DU Xue-bin，et al.Technical Requirements of Instrument in Network for Earthquake Monitoring——Geoelectrical Meters，Part 1：Direct Current Meter for Geoelectrical Resistivity[M].Beijing：Seismological Press，China，2008，DB/T 29.1-2008.(in Chinese)

[13] 杜学彬，赵家骝，谭大诚，等.地震台站建设规范 地电台站 第 1 部分：地电阻率台站[M].北京：地震出版社，2006，DB/T 18.1-2006.
DU Xue-bin，ZHAO Jia-liu，TAN Da-cheng，et al.Specification for the Construction of Seismic Station——Geoelectrical Station，Part 1：Geoelectrical Resistivity Observatory [M]. Beijing：Seismological，Press，2006，DB/T 18.1-2006.(in Chinese)

[14] 钱家栋，杜学彬，蔡晋安，等.地震地电观测方法 地电阻率第 1 部分：单极距观测[M].北京：地震出版社，2009，DB/T 33.1-2009.
QIAN Jia-dong，DU Xue-bin，CAI Jin-an，et al.The Method of Earthquake-related Geoelectrical Monitoring——Geoelectrical Resistivity Observation，Part 1：The Single Separation Observation[M]. Beijing：Seismological Press，2009，DB/T 33.1-2009.(in Chinese)

[15] 杜学彬，阮爱国，范世宏，等.强震近震中区地电阻率变化速率的各向异性[J].地震学报，2001，23(3)：289-297.
DU Xue-bin，RUAN Ai-guo，FAN Shi-hong，et al.2001.Anisotropy of the Variation Rate of Apparent Resistivity Near the Epicentral Region of Strong Earthquakes[J].Acta Seismologica Sinica，2001，23(3)：289-297.(in Chinese)

[16] 杜学彬，刘君，崔腾发，等.两次近距离大震前成都台视电阻率重现性、相似性和各向异性变化[J].地球物理学报，2015.(待发表)
DU Xue-bin，LIU Jun，CUI Teng-fa，et al.Repeatability，Similarity and Anisotropy Changes in Apparent Resistivity of Station Chengdu before Two Great Earthquakes in Near Distance [J].Chinese Journal of Geophysics，2015.(in Publication).(in Chinese)

[17] 康云生，安海静，马可兴，等.天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析[J].地震工程学报，2013，35(1)：190-195.
KANG Yun-sheng，AN Hai-jing，MA Ke-xing，et al. Test Analysis on Geo-electrical Resistivity Observation Combing the Surface and Deep-well Methods at Tianshui Seismic Station in Gansu Province，[J].China Earthquake Engineering Journal，2013，35(1)：190-195.(in Chinese).