

张国苓, 乔子云, 贾立峰, 梁红杰, 韩和平, 王艳荣, 2015. 河北阳原台地电阻率变化分析. 震灾防御技术, 10 (2): 464—471.
doi: 10.11899/zzyfy20150228

河北阳原台地电阻率变化分析¹⁾

张国苓¹⁾ 乔子云¹⁾ 贾立峰¹⁾ 梁红杰¹⁾ 韩和平²⁾ 王艳荣³⁾

1) 河北省地震局, 石家庄 050021

2) 阳原地电台, 张家口 075800

3) 三河地震台, 三河 065200

摘要 河北阳原台地电阻率 NE 测向 2014 年以来出现年变幅变小的年变畸变现象, 经核实, 这时的观测系统工作正常, 而降雨量与地电阻率的异常变化具有一定的相关性, 但通过褶积滤波法去除降雨量的影响后, 这种异常变化依旧存在。同时, 阳原台 NE 测向的地电阻率与自然电位在 2014 年的变化具有同步性, 也进一步验证了异常变化的可靠性。阳原台地电阻率观测位于晋冀蒙交界地区, 对地壳的应力-应变响应比较敏感, 其地电阻率异常变化与 1989 年大同地震和 1998 年张北地震有较好的对应关系, 并显示出持续时间长、幅度大和恢复慢的特点。因此, 阳原台地电阻率异常变化的可信度较高, 可为监测晋冀蒙交界地区的地震活动提供参考。

关键词: 地电阻率 阳原 异常分析

引言

在孕震过程中震中区及附近应力场的改变, 将会引起岩石的裂隙度及裂隙的连通性发生变化, 此时地电阻率也会随之发生改变。野外原地地电阻率的实验结果显示, 在低应力下地电阻率会随着岩石介质体积被压缩导致地电阻率的下降, 相反, 岩石介质体积膨胀时地电阻率会上升(赵玉林等, 1983)。近 40 年来地电阻率观测在地震监测预报工作中已经积累了大量的实际案例, 例如: 钱复业等(1982; 1987)和钱家栋(1993)发现, 在大震发生前, 震中区及其附近地区的地电阻率一般会表现出 2—3 年、幅度为百分之几到百分之十几的趋势性变化, 其中多以下降型负异常为主; 同时赵玉林等(1978)也发现, 在 1976 年唐山地震发生前, 昌黎台、宝坻台、唐山台等的地电阻率也出现了下降变化, 另外, 在 1976 年松潘地震发生前, 武都台的地电阻率也出现了下降变化; 还有张学民等(2009)也发现, 在 2008 年汶川地震发生前, 郫县台的地电阻率在单测向下降的幅度达到 7.2%, 下降持续时间在 2 年左右, 并在震前 5 个月出现异常转折, 而地震就发生在地电阻率恢复上升的阶段。

本文基于阳原台地电阻率观测呈现出的有规则的冬高、夏低年周期变化特征, 以及 2014 年 2 月出现的 NE 测向年变幅减小(年变畸变现象)和 NW 测向的年变形态及幅度与往年相

1 基金项目 国家自然科学基金(41274079)和震情跟踪定向工作任务(2015010403)共同资助

[收稿日期] 2015-02-01

[作者简介] 张国苓, 女, 生于 1986 年。河北省地震局工程师。主要研究方向: 地震电磁学和地震预测研究。

E-mail: zhangguoling002@163.com.

当的资料(图 1),并结合观测系统检测和背景场环境以及各年度日均值数据的相关性分析结果,重点分析了降雨量对阳原台地电阻率 NE 测向的趋势性影响。同时还进一步验证了阳原台地电阻率 NE 测向出现的异常变化(年变畸变现象)的可靠性。

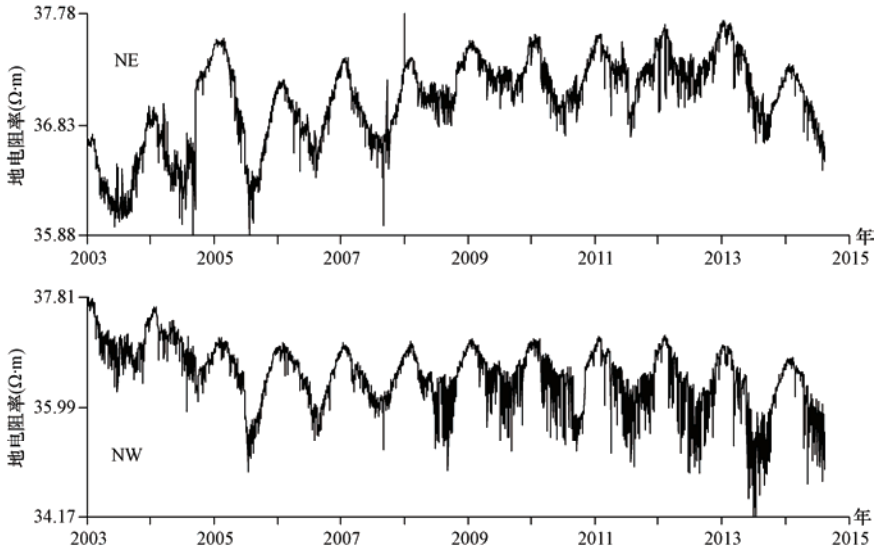


图 1 阳原台地电阻率日均值

Fig. 1 Daily resistivity at Yangyuan station

1 阳原台地电阻率观测概况

阳原台位于阳原县西城镇北关村,处于晋冀蒙三省交界处,属阴山—燕山和太行山两大构造交汇处。本地区主要活动断裂为北东东向延展的南山山前断裂(又称六棱山山前断裂)和北山山前断裂(又称八棱山山前断裂),两条断裂均为倾向盆地中心的正断层。由于阳原台的地电阻率测点位于断裂带和冲积扇上,因此有利于监测来自地壳深部的信息。

阳原台地电阻率观测有 $N22^{\circ}E$ 和 $N68^{\circ}W$ 两个测向,使用的仪器为 ZD8B 型地电仪,供电极距和测量极距分别为 1.2km 和 0.2km。测区的电测深曲线为 QQ 型,地下电性结构可分为三层:第一层为第四纪黄土层,夹有砾石,电阻率为 $125.19\text{—}130.61\Omega \cdot \text{m}$,层厚为 18.0—19.8m;第二层为泥层,电阻率为 $11.29\text{—}15.27\Omega \cdot \text{m}$,层厚为 51.2—101.9m;第三层为粘土层,电阻率为 $4.12\text{—}4.21\Omega \cdot \text{m}$,层厚为 113.6—145.3m。第三层以下为砂质灰岩层,电阻率为 $2.75\text{—}3.24\Omega \cdot \text{m}$ 。图 2 为阳原台岩性柱状图、电测深曲线和区域地质构造图。由于测区内有大秦铁路穿过,同时还有小型液化气站位于测区中央,所以对数据观测有一定的影响。

2 阳原台地电阻率变化分析

2.1 观测系统检测

根据《地震及前兆数字观测技术规范(电场观测)》(中国地震局科技监测司,2001)的要求,阳原台地电阻率观测仪器和系统每个季度定期检测一次,其结果显示测量仪器校检、稳流电源性能、供电线、测量线绝缘等均符合规范的要求,同时各电极接地电阻稳定。2014

年 6 月 16 日, 由河北省地震局预测研究中心电磁组和中国地震台网中心组成的工作组, 到阳原台进行了现场考察, 给出了电极连接良好、外线路无破损、线杆及瓷瓶无损毁的测评意见。同时, 工作组还用 ZC-8 型接地电阻仪测量了各电极的接地电阻, 并利用 ZC-7 型兆欧表测量了各测量线的绝缘电阻, 其结果与 2013 年、2014 年的各季度校验基本一致, 具体如表 1 所示。从表中可以看出, 供电极接地电阻小于或等于 30Ω, 测量线路对地绝缘电阻大于或等于 5MΩ, 均符合规范要求。

地质时代	深度	厚度	剖面	岩性描述
Q3-4	19.59	19.59		粉土, 局部夹碎石
Q1	71.24	51.65		游泥
	97.55	26.31		粘性土夹卵石 局部有钙核
N	111.65	14.10		粘土, 下部为钙质胶结
Z	147.98	26.33		粘土, 致密, 坚硬
	151.31	3.33		砂质灰岩

(a) 岩性柱状图

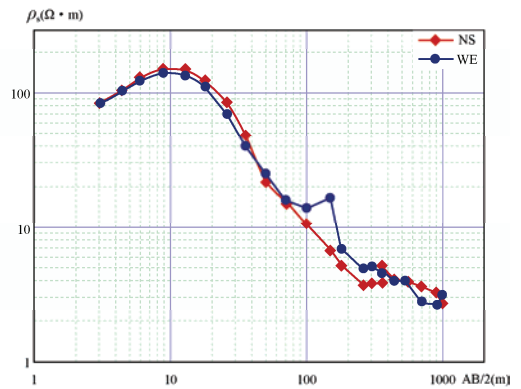
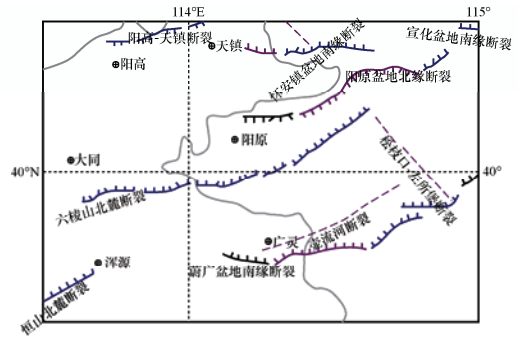


图 2 阳原台岩性柱状图、电测深曲线和区域地质构造图

Fig. 2 Basic background of Yangyuan geoelectrical station

表 1 部分电极的接地电阻结果

Table 1 The grounding resistance of some electrodes

检查日期	方位	测量线绝缘电阻检查仪器型号: ZC-7		电极接地电阻检查仪器型号: ZC-8	
		M (MΩ)	N (MΩ)	A 极 (Ω)	B 极 (Ω)
2014.06.03	N22°E	>500	>500	15.6	18.3
	N68°W	>500	>500	17.5	17.4

2.2 背景场环境

工作组对阳原台周边一定范围内新建(或改建)工程以及其它环境变化情况进行了专门的

巡查和走访。在测区内，有一个 1993 年 9 月修建的小型液化气站；1987 年修建的大秦铁路从测区通过，铁路距 NW 道的东供电电极 (B3) 只有 20m；同时 NW 道的西测量电极 (M3) 附近有一个小型养羊场，其建于 2014 年 4 月位于 NW 测线的北边，距 M3 电极约 100m；另外 NW 道的东测量电极 (N3) 附近有两个蘑菇大棚，其建于 2010 年位于 NW 测线的南边，距 N3 电极约 200m。由于养羊场和蘑菇大棚采用钢丝网接地，所以形成了一个低阻体，在雨季时其对 NW 道地电阻率有一定影响，但对 NE 道干扰不大，如图 3 所示。根据笔者核实，周边建筑物造成的环境影响在时间上与 2014 年阳原台地电阻率 NE 测向出现的年变畸变并不同步。



图 3 阳原台地电阻率测区背景

Fig. 3 The resistivity interference of Yangyuan station

2.3 地电阻率与降雨的关系

阳原台的地电阻率观测资料显示，每逢雨季地电阻率就会出现突变，且 N68°W 测道比 N22°E 测道受降雨影响更明显。笔者统计了 2003 年以来阳原地区的降雨量后发现，阳原的日地电阻率受降雨的影响比较明显，降雨后地电阻率测值开始下降，而且表现为降雨越大，测值下降的幅度越大；降雨停止后，随着地面慢慢变干，测值又逐渐恢复到变化前的状态。阳原台地电阻率在夏季呈现“山羊胡子”状变化，其主要原因是受降雨影响（见图 1）。从月降雨量和地电阻率的关系（图 4）可以看出，每年的 6—9 月为降雨量较大的季节，地电阻率较低，存在冬高、夏低的年变规律。笔者通过统计地电阻率月均值与月降雨总量的相关关系后发现，其相关系数达 0.7 左右，说明地电阻率与降雨量有较好的相关性。另外从机理上看，这可能也与大秦铁路穿过测区有关（图 5），降雨时地下电极与铁轨形成通路，供电后就会有部分电流流向铁轨，从而造成测值降低。

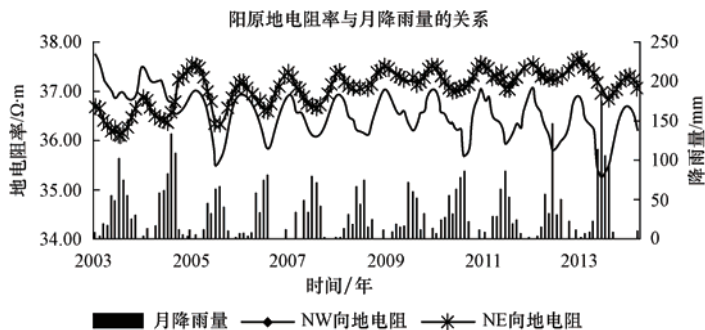


图 4 阳原台地电阻率月均值与降雨量的关系

Fig. 4 Relationship between resistivity and monthly rainfall at Yangyuan

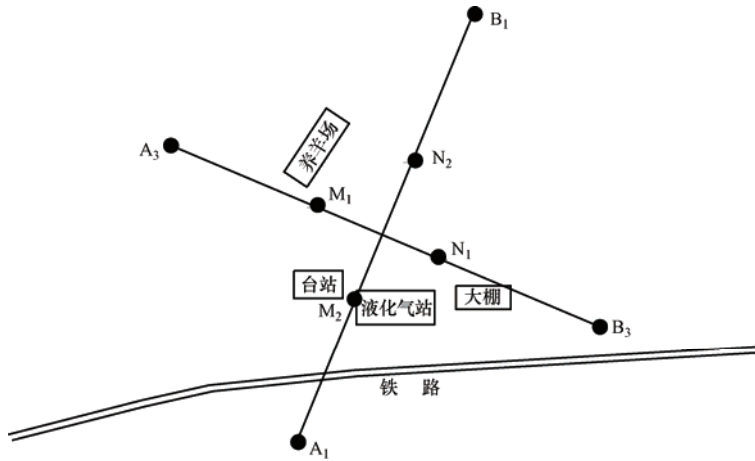


图 5 阳原台地电阻率布极及环境示意图

Fig. 5 Sketch map showing the resistivity poles and environment of Yangyuan station

地电阻率观测的是一定体积内岩层电性结构随时间的变化，而区域内表层电性可能受测区内环境、气象和水文条件变化的影响（刘允秀等，1999）。降雨对地电阻率的影响比较复杂，它不仅有一定的即时效应，还存在一定的时间滞后效应，利用褶积滤波法可以较好地去除降雨对地电阻率的影响（张学民等，1996）。

根据褶积滤波法原理，即把土层看成一个系统，降雨量 $C_R(t)$ 作为输入信号，当降雨量对 ρ_s 的影响函数为 $R(t)$ 、地电阻率的趋势变化为 $M(t)=B_0+B_1t$ 时，则地电阻率 $\rho_s(t) = M(t) + R(t) \times C_R(t)$ ，如果将降雨的即时及滞后效应考虑进去的话，则有：

$$\rho_s(t) = M(t) + R(t) \times C_R(t) = B_0 + B_1t + \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R(\tau)C_R(t-\tau)$$

例如选取滞后影响时间为 5 个月时，则上式可表示为：

$$\rho_s(t) = B_0 + B_1(t) + A_0C_0 + A_1C_1 + A_2C_2 + A_3C_3 + A_4C_4 + A_5C_5$$

张学民等（1996）曾利用上述方法对昌黎台的地电阻率进行了降雨量校正，计算结果表明其效果要比使用一般的回归方法好。笔者利用 Matlab 软件对 2003—2014 年阳原台降雨量对 NE 向地电阻率的影响值进行了多元回归计算，其结果如图 6 所示。从图中可以看出，阳原台 NE 向地电阻率年变主要是由降雨量引起的，当去掉降雨量的影响后，地电阻率相对稳定一些，年变不再清晰，但是还是存在趋势性变化，也就是说这种趋势性的地电阻率年变畸变下降变化，不是仅由降雨量造成的。

2.4 地电阻率与自然电位的对比

图 7 是阳原台 NE 向自然电位变化曲线，从图中可以看出，NE 测向的自然电位在 2014 年的幅值要比往年的高，出现了年变畸变，而 NW 测向的自然电位变化不明显，这表明在时间和测向上自然电位与地电阻率有很好的对应关系。尹相好等（2010）在总结了前人的研究后认为，当自然电位和地电阻率同时发生异常变化时，可提高异常的可信度。同时异常出现的时间与地震的发生也有比较好的对应关系，例如：1998 年 12 月 9 日山东莒县陵阳 $M_L4.1$ 级地震和 2001 年 4 月 14 日山东五莲于里 $M_L3.8$ 级地震发生前，在山东莒县深井的地电阻率和自然电位同时出现了异常变化。从物理成因上来说，在地震发生前由于应力的积累，地下介质会发生变化，

裂隙的膨胀和发展以及地下流体的共同作用，可能会造成自然电位和地电阻率同时发生变化。

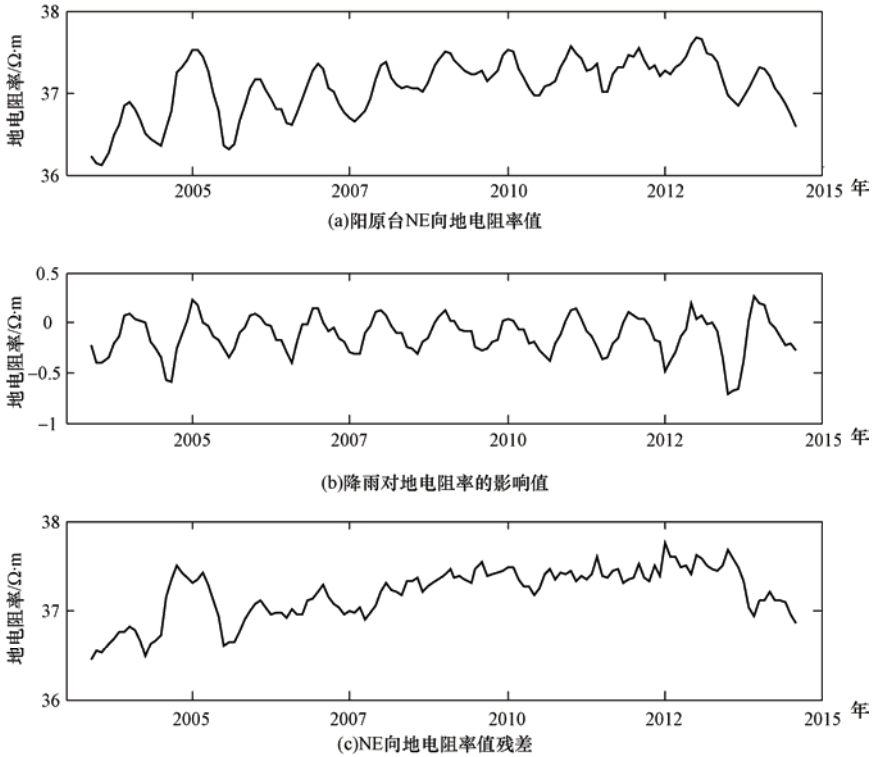


图 6 降雨定量校正后地电阻率曲线图

Fig. 6 The resistivity curve after removing the rain effect

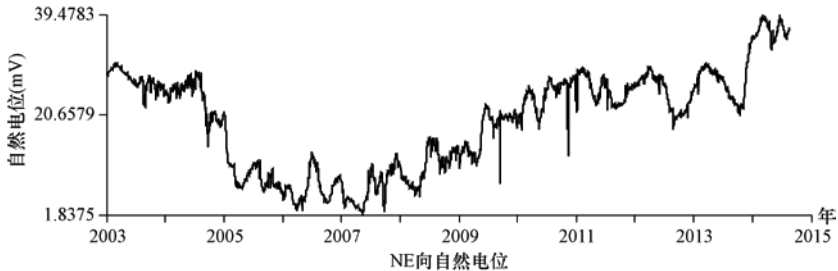


图 7 阳原台 NE 向自然电位变化曲线

Fig. 7 The spontaneous potential curve in NE direction at Yangyuan station

2.5 震例总结

张国民等（1995）的研究表明，在中国大陆发生的地震往往具有成组活动的特征，即地震的发生在时间和空间上具有相对集中的特点。同时，大量的地震案例也证实，地电阻率的异常变化与成组地震的发生有一定的对应性，这种现象在地电阻率台站密集的华北地区表现的尤为显著。在 1989 年大同地震和 1998 年张北成组地震发生时，就有多个台站记录到了长时间的地电阻率异常，并且异常的时空变化对成组强震活动的迁移有一定的指示意义。这种异常多呈现出比单个地震更为复杂的形态特征，异常往往持续到成组地震中最后一个强震发

生后才结束（王志贤等，1994；1996a；1996b；汪志亮等，2000；2002；张学民等，2003）。总体表现为趋势性变化背景下的反复升降，并呈现出异常持续时间长、幅度大和恢复慢的特点（严玲琴等，2013）。

自 1977 年至今，阳原台地电阻率观测已经连续进行了 37 年，在此期间，距离台站 300km 范围内发生的 M_S 5.0 级以上地震共有 8 次（去除余震）。在张学民等（2003）总结震例的基础上，笔者对阳原台地电阻率观测数据进行了重新分析后发现，在几次地震发生前阳原台的地电阻率都曾出现过显著的年变畸变异常变化，这种地电阻率的异常变化对距离阳原台 300km 以内的地震具有很好的映震能力，尤其是对晋冀蒙交界地区发生的中强地震，具体映震能力如表 2 所示。

表 2 阳原台地电阻率异常变化对地震的映震能力

Table2 Corresponding earthquakes of resistivity at Yangyuan station

发震时间 (年-月-日)	发震震中	震级 (M_S)	震中距 (km)	异常持续时间 (月)	最大异常幅度 (%)	异常描述
1989-10-18	山西大同	5.7	25.8	13	3.9	NE、NW 两测道 出现年变畸变
1989-10-19	山西大同	5.9	25.7			
1991-01-29	山西忻州	5.1	229.2			
1991-03-26	山西大同	5.8	27.9			
1998-01-10	河北张北	6.2	112.6	23	NE、NW 两测道出现年变畸变， 年变幅变小，几乎消失	
1999-03-11	河北张北	5.6	129.5			
1999-11-01	山西大同	5.6	37.5			
2006-07-04	河北文安	5.1	227.9	6	2.8	NE 测向年变畸变

3 结论与讨论

通过对观测系统的检测，确认阳原台地电观测仪器、外线路、电极工作状态正常。测区背景场环境调查和辅助资料分析表明，降雨量和地下水位引起地电阻率数据异常的可能性较小，阳原台的地电阻率变化反映了真实的应力变化，可视为地震前兆异常。同时，通过地电阻率与自然电位的对比分析后发现，阳原台地电阻率的 NE 测向与自然电位在 2014 年的变化具有同步性，验证了地电阻率异常的可靠性；阳原台地电阻率的异常变化多以年变畸变为主，2014 年以来的异常形态与 1998 年大同地震和 2006 年文安地震发生前的异常形态较为类似。综合分析认为，阳原台地电阻率异常变化的可信度较高，可视为地震前兆异常，类型为背景异常。

参考文献

- 刘允秀，陈华静，程瑞年等，1999. 地电阻率与地下水位、大气降水关系研究. 中国地震, 15 (2): 184—189.
 钱复业，赵玉林，于谋明等，1982. 地震前地电阻率的异常变化. 中国科学 (B 辑), (9): 831—839.
 钱复业，赵玉林，许同春，1987. 地电阻率季节干扰变化分析. 地震学报, 9 (3): 289—302.
 钱家栋，1993. 与大震孕育过程有关的地电阻率变化研究. 中国地震, 9 (4): 341—350.

- 汪志亮, 王志贤, 余素荣等, 2000. 地电前兆场特征及有关地震预报问题探讨. 地震, 20 (1): 147—153.
- 汪志亮, 郑大林, 余素荣, 2002. 地震地电阻率前兆异常现象. 北京: 地震出版社, 3—47.
- 王志贤, 彭远黔, 王丽, 1994. 地电阻率短临前兆异常的判定方法研究. 地震, (1): 88—96.
- 王志贤, 彭远黔, 1996a. 地震地电阻率法的统计预报研究. 山西地震, (2): 34—39.
- 王志贤, 彭远黔, 张学民, 1996b. 地电阻率异常变化与地震成组活动关系的研究. 华北地震科学, 14 (1): 19—26.
- 严玲琴, 郑卫平, 张辉等, 2013. 临夏台地电阻率变化与震兆现象分析. 中国地震, 29 (1): 168—176.
- 尹相好, 田凤东, 赵庆红等, 2010. 山东莒县深井电阻率资料分析. 防灾减灾学报, 26 (2): 70—74.
- 张学民, 王志贤, 臧明珍等, 1996. 降雨对地电阻率干扰的分析. 华北地震科学, 14 (4): 71—75.
- 张学民, 刘素英, 2003. 华北地区成组地震前后的地电阻率异常特征. 华北地震科学, 21 (4): 10—18.
- 张学民, 李美, 关华平, 2009. 汶川 8.0 级地震前的地电阻率异常分析. 地震, 29 (1): 108—115.
- 赵玉林, 钱复业, 杨体成, 1983. 原地电阻率变化的实验. 地震学报, 5 (2): 217—225.
- 赵玉林, 钱复业, 1978. 唐山 7.8 级强震前震中周围形变电阻率的下降异常. 地球物理学报, (3): 181—190.
- 张国民, 耿鲁民, 张永仙等, 1995. 构造块体的成组孕震模型和前兆场某些特征的分析. 地震学报, 17 (1): 1—10.
- 中国地震局科技监测司, 2001. 地震及前兆数字观测技术规范 (电场观测). 北京: 地震出版社, 21, 26, 34—37.

Analysis on the Anomaly of Resistivity at Yangyuan Station, Hebei Province

Zhang Guoling¹⁾, Qiao Ziyun¹⁾, Jia Lifeng¹⁾, Liang Hongjie¹⁾,
Han Heping²⁾ and Wang Yanrong³⁾

1) Earthquake Administration of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China

2) Yangyuan Seismic Station, Zhangjiakou 075800, China

3) Sanhe Seismic Station, Sanhe 066600, China

Abstract The Geoelectric resistivity monitoring from Yangyuan station detected that the annual amplitude of resistivity in NE direction became smaller since 2014. After verification, we found that the observation system is working properly and there was correlation between rainfall and ground resistivity. The abnormal is still exist after removing the effects of rain by convolution filtering method. The NE resistivity and natural potential changes in 2014 is synchronous, so the reliability of earth resistivity anomaly is improving. The ground resistivity variation has a good relationship with the history of earthquake group at Shanxi, Hebei and Inner Mongolia border area, such as 1989 Datong earthquake, 1998 Zhangbei earthquake, et al.. The anomaly of resistivity at Yangyuan station is sensitive to stress change of the earth crust. Therefore, the anomaly of the earth resistivity has a higher reliability to earthquake prediction, and we should pay close attention to the seismic activity at Shanxi, Hebei and Inner Mongolia border area.

Key words: Resistivity; Yangyuan Station; Anomaly analysis