

# 天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析\*

杨兴悦<sup>1</sup>, 杨立明<sup>2</sup>, 康云生<sup>2</sup>, 安海静<sup>2</sup>, 郝臻<sup>2</sup>, 武银<sup>1</sup>, 王燕<sup>1</sup>

(1. 甘肃省地震局 天水中心地震台, 甘肃 天水 741020; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**介绍了天水地震台井下地电观测系统场地布设方式、测项设计安装技术要求和施工要点, 并对原有观测资料和新系统观测资料进行了对比分析。结果显示: 采用井下观测系统能减少干扰、提高信噪比, 缓解地电观测用地与经济建设的矛盾, 是地电观测方式的新探索。

**关键词:**井下观测; 地电观测; 地电阻率; 天水地震台

**中图分类号:** P319.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2012)01-0092-06

## 0 引言

地电阻率观测是我国地震监测的主要方法之一, 在地震监测预报中发挥着重要作用。从1966年邢台地震后我国开始开展地震地电阻率观测, 至今40多年来积累了大量的观测数据和研究成果, 在方法理论、观测技术、观测数据应用等方面取得了很大发展, 在国内外地震电磁学领域占有一定地位(赵洁等, 2008)。天水台地电阻率在地震预测方面也发挥着重要的作用, 如汶川8.0级地震前天水地电阻率NS道出现大幅异常(方炜, 2009), 震前42天测值突升, 高值持续两个月才逐渐恢复到原来的状态, 说明天水地电能够反映地震前兆信息, 但是反映地震前兆信息的首要前提是有良好的观测环境。

目前, 国内的地电阻率观测技术多采用对称四极法, 其供电电极和测量电极的埋深为2 m左右, 供电极距多为1 000~2 000 m, 观测系统占地面积大, 需要环境保护区的范围达2~5 km<sup>2</sup>, 较大的保护区使部分地电台站观测环境保护的任务越来越重(田山等, 2009; 聂永安等, 2010)。随着地方经济的快速发展, 地震观测环境逐渐遭到破坏, 观测到的数据中干扰信息日益增多。天水地震台地电测区被天水甘泉物流园征用, 观测资料受到严重干扰, 在这种背景下, 经过多次论证专家们认为在原测区可以尝试井下地电阻率观测方案。使地电台避免大的干扰, 继续发挥重要的作用。

利用钻井的方式进行地电观测, 有助于消除降雨、灌溉、金属管线等地表特定影响因素对观测数据造成干扰, 对地表部分电磁环境干扰也有一定的抑制作用。我国山东等地在多年前就开始地电井下观测, 1979年7月山东临沂台井下电阻率开始观测, 4口观测井呈东西向等间距排列, 间距为7 m, 井深30 m, 供电、测量电极均置于井底(王帮本等, 1981; 孟庆武, 阎洪朋, 1991); 莒县、费县、苍山县地震局等也较早开展井下电阻率观测, 其中莒县观测井井深209.27 m, 供电电极分别在井中186 m处和15 m处, 测量电极分别在井中150 m和50 m处; 苍山县井深162.29 m, 费县井深161.19 m, 供电电极和测量电极全部放入井中, 按一定极距布设电极(孙承德等, 1996, 1998); 临沂市的郯城县、沂南县、蒙阴县地震局目前仍在进行深井电阻率仪器观测(尹相好等, 2010)。近年来我国各地开始建立系统化的电阻率台站, 2010年1月红山基准台大柏舍地电台井下电阻率架设仪器并观测, 4口观测井等间距排列, 井深100 m, 间距为20 m; 陕西合阳台于2011年7月开始地电深井观测, 测道有东西向、南北向和垂直向, 共7口井, 其中一口井为东西、南北测道共用, 垂直观测也设置在此井。每口井深120 m, 供电极距120 m, 测量极距为40 m, 另外该深井项目还进行地电场观测。虽然有少数台站进行井下地电阻率观测, 但目前仍处于探索阶段, 没有直接经验可以借鉴, 所以天水地电观测系统建设仍在摸索中。井下观测与地面观测相比, 在

\* 收稿日期: 2011-06-10.

基金项目: 中国地震局“星火计划”项目井下地电观测实用技术研究课题(XH1025)资助。

安装施工方面存在许多困难，安装施工过程中发现的一些问题及解决途径有一定的参考价值，特别是井下综合观测、效能对比对同类观测、施工有着重要的参考意义，期望天水井下地电观测方案为干扰严重地区的地震地电观测提供一定的参考价值。

天水地电布极方案主要以地电阻率测项为主，采用井下观测方式成本高，为了有效利用资源，实现效能最大化，该项目同时设计地电阻率、大地电场和地温梯度的综合观测。笔者在本文中只讨论地电阻率观测。

1 测区地质构造背景和外场地规划

天水井下观测区域位于天水甘泉物流园，地处崖湾村与白石村之间的永川河 1、2 级河谷阶地上，上覆第四系覆盖层，厚 20 ~ 30 m，其下是第三系粘土层，厚约 450 ~ 500 m，基底为古生界变质岩。海拔 1 153 m，年平均湿度约 63%，年平均温度 18 ℃（张新基等，2005）。

项目设计的外场地建设方案为一次性施工，在场地规划、布极、布线方案中，以地理设施的长久安全为首选，尽可能优选公路边和人行道，信号线采用全地埋方式布设，以蛇形弯曲布设为主。布极分布近似等边直角（81°）三角形，大致呈北南、东西、北东向分布。北南、东西向井孔间距 100 m，北东向井孔间距 130 m，共 9 口井。由于场地限制，NS、EW 向井孔并非四点一线，但

偏差在极距的 5% 以内，符合《地电台站观测技术规范》（国家地震局，1986）要求，井孔位置分布如图 1 所示。

2 电阻率观测方案

井下多测项地电阻率观测不仅是观测方式的改变，还是地电方法新的探索和实验，目标的于提高信噪比，缓解地电观测用地与经济建设的矛盾，因此，对外场地设施的技术指标要求较高，实现难度大。与架空方式相比，井下高湿度、高压强环境下地埋线路的高绝缘指标本身困难多，线路接头处理中稍有不慎将造成钻孔报废，损失数万元，除重新打孔外别无挽救的可能，客观上难度和风险并存，因此在施工过程中充分考虑了这些因素。

2.1 布极情况

地电阻率进行深层、浅层和垂直观测，深层和浅层电极埋设深度分别为 100 m 和 6 m，布极呈近似等边直角三角形，大致呈北南、东西、北东向分布。NS、EW 向供电电极距为 300 m，测量极距为 100 m，NE 向供电电极距为 390 m，测量极距为 130 m。对 8 井进行垂直观测，供电极深分别为 100 m、4 m，测量极深分别为 68 m、36 m。另接标准负载（由 2 个 20 Ω 和 1 个 0.01 Ω 电阻组成）对观测系统进行验证。电阻布极情况如图 2 所示。

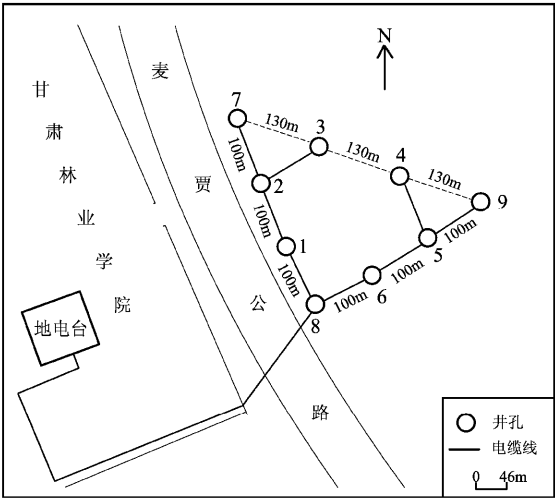


图 1 井孔位置分布图（黑粗线为信号线布设位置）  
Fig. 1 Distribution of borehole location  
(thick black lines stand for layout position of signal lines)

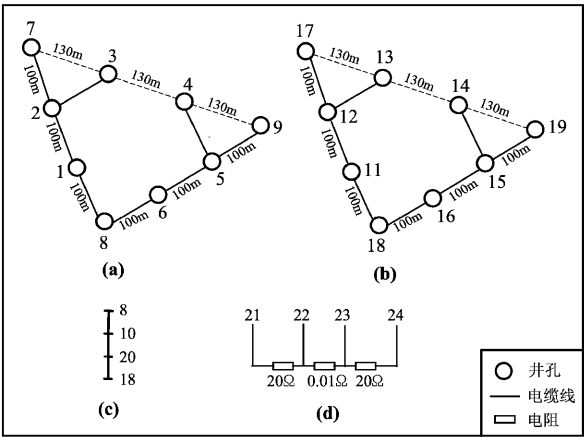


图 2 布极示意图  
(a) 浅层布极；(b) 深层布极；(c) 垂直布极；  
(d) 标准负载  
Fig. 2 Schematic diagram of electrode arrangement  
(a) Electrode arrangement in shallow layer; (b) Electrode arrangement in deep layer; (c) Electrode arrangement in vertical direction; (d) standard load

2.2 观测方式

多极距地电阻率观测在国内外开展较早，从 20 世纪 70 年代开始发展到今天，理论比较成熟，在机理方面也有优势（毛先进等，2008）。天水井下地电观测采用 ZD8MI 多极距电阻率观测系统，和供电电源配合可自动、定时地测量 20 个测道的地电阻率和自然电位差；仪器的主要工作参数如装置系数、供电时间、供电方式、一组测量的观测次数等均可在现场人工置入或通过观测网络修改。多极距地电阻率观测方法，不仅在一定程度上可以消除目前的单一极距地电阻率观测易受浅层环境干扰的问题，而且可以减小或消除年变化现象对地电阻率观测的影响（王兰炜等，2011）。

多极距电阻率观测系统包括浅层水平观测（3 道）、深层水平观测（3 道）、上供下测（6 道）、下供上测（6 道）、垂直观测（1 道）和验证测量系统（1 道），共计 20 个通道。通道号供电极、测量极和装置系数对应情况见表 1。地电阻率数据为日值，初步选在每天人为干扰最小的凌晨 3、4 时分成两段测量，每天只测 1 次，测量结果比使用数据平均值好。观测数据可以通过网络在远程下载、入库。

表 1 供电极、测量极布设情况和装置系数对应表  
Tab.1 Arrangement of the transmitting electrode and the measuring electrode, and the matchup between the array coefficient, the transmitting electrode and the measuring electrode

通道号	供电极 A	供电极 B	测量极 M	测量极 N	装置系数 K
01	7	8	2	1	628
02	8	9	6	5	628
03	7	9	3	4	817
04	17	18	12	11	1 257
05	18	19	16	15	1 257
06	17	19	13	14	1 634
07	7	8	12	11	1 208
08	8	9	16	15	1 208
09	7	9	13	14	1 253
10	17	18	2	1	1 208
11	18	19	6	5	1 208
12	17	19	3	4	1 253
13	7	8	17	18	459
14	8	9	18	19	459
15	7	9	17	19	418
16	17	18	7	8	459
17	18	19	8	9	459
18	17	19	7	9	418
19	8	18	10	20	268
20	21	24	22	23	4 000

2.3 技术措施

电阻率电极采用筒状铅板电极，为了加工方便将铅板卷在口径为 16 cm 的 PVC 管子上，供电极铅筒为空心，高 1 m，铅板厚 0.8 cm，测量极铅筒高 1 m，铅板厚 0.3 cm。

为了避免传输线中间存在接头的问题，供电极深层、浅层电极各用 1 条 4 mm×2.5 mm 铠装铜芯线，其中红、绿、蓝三芯线并在一起与电极连接；测量极红芯线接铅电极（绿、蓝接其它测项），包好黄芯线保证绝缘，作为同质替代验证线路绝缘。在将信号线引入观测室前接入避雷器，电阻率供电极、测量极分别采用规格为（200×400×600）mm<sup>3</sup> 不锈钢机箱独立安装电极引线的避雷器，氧化锌浪涌避雷器单元的峰压为 470 V，瞬时电流 40 kA，同箱中安装 RS-485 接口 20 kA 数字式雷电计数器 1 个，记录雷电事件的时间和强度。

3 实际观测结果对比分析

天水井下电阻率观测系统于 2011 年 3 月 27 日开始试运行，观测系统运行正常，观测数据良好，观测结果符合地电观测要求。本文选取 2011 年 4~9 月所有测道的数据进行对比研究（图 3），EW，NS，NE 道按不同观测方式可以测 6 组数据，6 组数据相互比较，可以看出浅层观测电阻率变化幅度大，深层观测变化幅度小（图 3a~c）；垂直观测变化幅度也较小（图 3d）；同时用已知电阻进行测量来验证仪器是否工作正常（图 3e）。总体来说从图 3 中可以看出深层电阻率没有年变，其它观测方式年变明显。

由于观测系统还在试运行阶段，目前仪器使用交流电，没有接入稳流源，无备用电源，图 3 中缺数是由停电造成的。谭大诚等（2005）研究表明，稳流源对地电阻率观测系统的影响主要有两方面：一是稳流仪输出电流的稳定性与测量数据的可靠性有直接关联；二是稳流仪的设计采用高频开关技术以及各种提高可靠性的技术后能有效增强观测系统运行的可靠性。因此天水井下观测系统正式运行后，接入稳流仪会使测值的可靠性更高。

井下电阻率每天选定一个干扰相对干扰较小或无人为干扰时段的测值作为日测值，而传统地电阻率观测得到的是整点值，将整点值平均后作为日测值。从图 3 可看出井下地电阻率受干扰程度相对较小，浅层水平观测测值比其他观测方式测

值变化幅度大。上供下测是由浅层供电电极供电，深层测量极测量；下供上测是由深层供电电极供电，浅层测量极测量；上 AB 供下 AB 测是浅层供电电极供电，深层供电电极测量；下 AB 供上 AB 测是深层供电电极供电，浅层供电电极测量。天水井下电阻率测值变化幅度很小，观测以来 EW，NS，NE 道浅层电阻率最大变幅分别为1.6,1.88, 0.14  $\Omega \cdot m$ ，深层电阻率最大变幅分别为 0.02, 0.03, 0.37  $\Omega \cdot m$ ，其它观测方式电阻率变幅在 0.06 ~ 0.3  $\Omega \cdot m$ ，说明井下观测能很好的抑制来自地面的干扰。

天水井下观测系统原有电阻率观测系统布极参数分别为，EW 道：AB = 900 m，MN = 300 m；

N15°W 道：AB = 1 000 m，MN = 333 m；N45°W 道：AB = 240 m，MN = 40 m。电极与地面平行埋入 2 m 深土层，外线路为电缆架空。经过预处理后的电阻率测值曲线如图 4 所示。

由于原有的地电观测系统和目前的井下地电观测系统的极距和电极的深浅不一致，井下观测系统采用多测道观测方式，而原有电阻率只能观测三道，所以观测数据无法直接比较。只能将原有地电电阻率与井下浅层电阻率进行简单地比较。为了和井下电阻率比较，原有观测系统时段也选在 4 ~ 9 月，原有电阻率 EW，NS，NE 道电阻率变幅分别为 1.56, 0.46, 5.72  $\Omega \cdot m$ ，从测值来看原

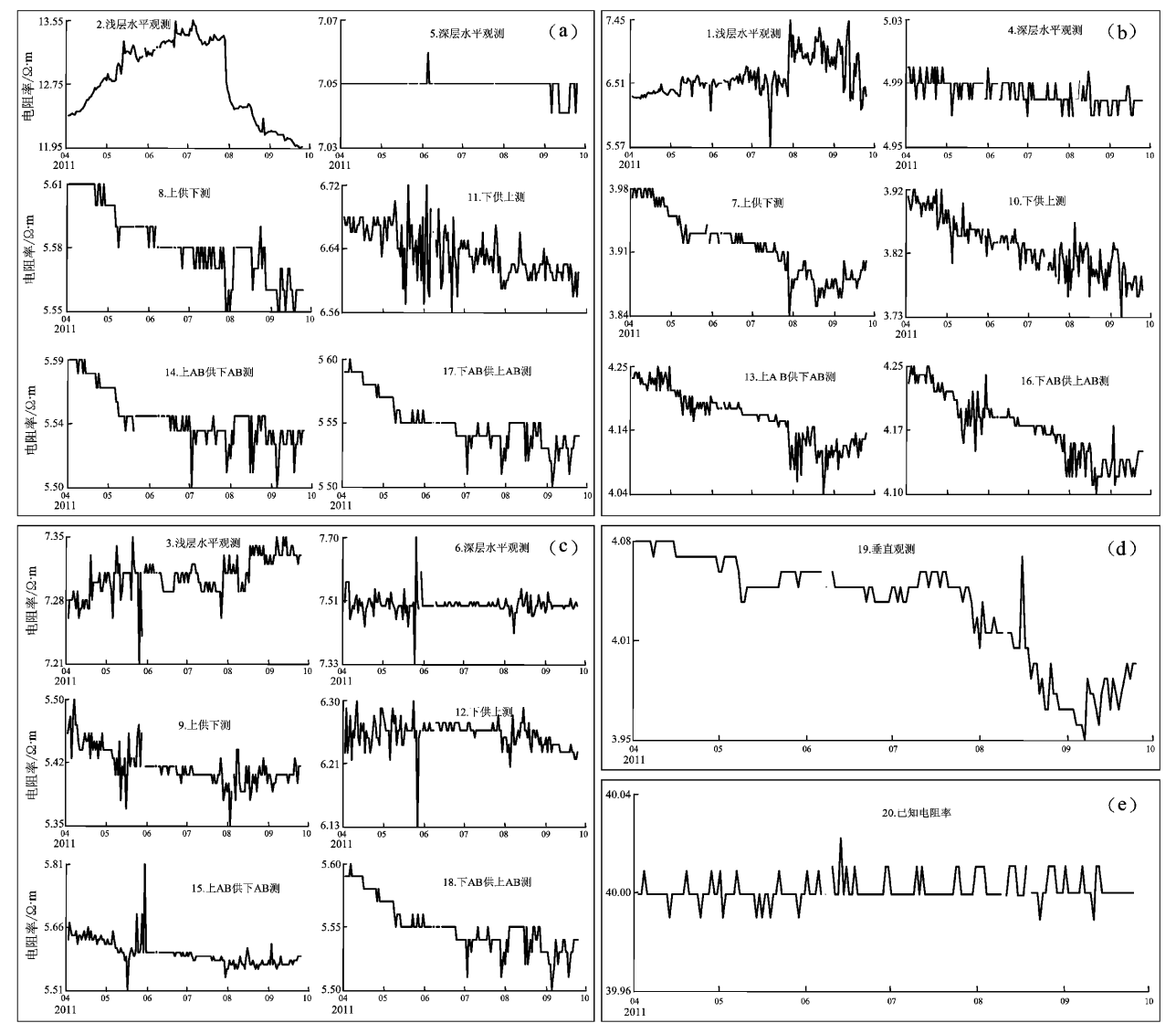


图 3 天水井下电阻率日测值曲线

(a) EW 道；(b) NS 道；(c) NE 道；(d) 垂直观测；(e) 验证系统

Fig. 3 Daily observational value curves of electrical resistivity in underground well at Tianshui Station

(a) EW direction；(b) NS direction；(c) NE direction；(d) Vertical observation；(e) Verifying system

有观测系统预处理后的测值变化幅度比井下观测系统浅层观测方式测值范围要大。虽然井下观测系统无法与原有观测系统逐一比较,但是在理论上如果井下电极位置和供电电极距选择合理,测值会较为理想。聂永安等(2010)通过算例数值计算结果表明,地下观测装置可以减小甚至消除地表环境变化对视电阻率观测结果的影响,而又能提高视电阻率对基岩电阻率变化响应的灵敏度。虽然井下观测系统测值变化幅度较原有观测系统小,但目前在映震能力方面还没有震例可供研究,目前在这方面还无法下结论哪套系统更具优势。井下电阻率观测系统的映震能力强弱只有等待观测较长时间并积累一些震例后才能得出结论。

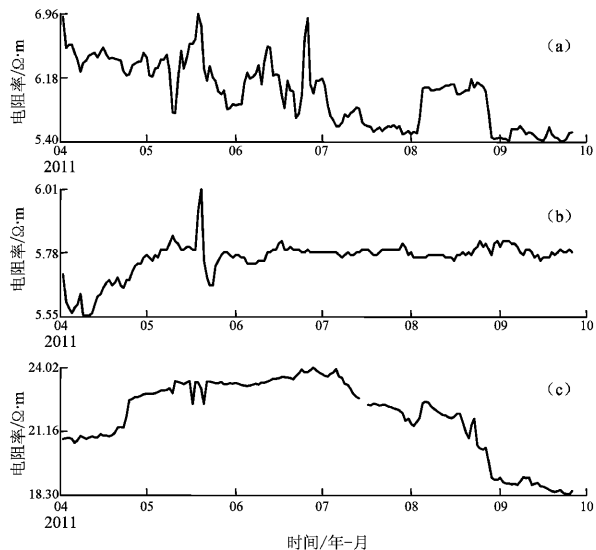


图4 2011年4~9月天水电阻率日测值曲线

(a) EW道; (b) N15°W道; (c) N45°W道

Fig. 4 Daily observational value curves of electrical resistivity at Tianshui Station from Jan., 2010 to July, 2011

(a) EW direction; (b) N15°W direction;

(c) N45°W direction

## 4 结论

(1) 天水地电观测系统已正常运行,系统产出的数据内在质量符合观测规范要求。此观测系统是一个新兴的项目,是地震观测环境受到严重破坏时创新性的尝试,是解决地震观测与经济建

设之间矛盾的有效途径。该方法具有能大大缩小观测环境保护区范围,对地电阻率变化信息的测量响应程度高,以及对来自地表的干扰有较强抑制能力等优点,是未来地震地电观测的发展方向。

(2) 对天水井下地电观测信号线进行全程地埋,使线路不容易受到损坏,也避免了雷击,观测人员不用像过去使用普通电阻率观测那样查线,减轻了负担,井下观测受外界环境干扰小。但这种方式也存在弊端,即一旦井下电极或线路出现故障,基本上无法进行维修。

(3) 本文中只介绍了地电阻率观测,今后还可利用钻孔资源进行多测项多方位立体综合观测实验,实现效能利用最大化。本文对观测系统、观测方案及技术途径等的介绍能为以后井下观测系统建设提供参考。

## 参考文献:

- 方炜. 2009. 地电阻率各向异性度的动态演化与汶川地震孕育过程[J]. 地震地磁观测与研究, 30(6): 21-26.
- 毛先进, 钱家栋, 杨玲英. 2008. 地电阻率多极距观测及研究进展[J]. 地震研究, 31(4): 406-412.
- 孟庆武, 阎洪朋. 1991. 临沂台深井电阻率异常变化与地震的关系[J]. 西北地震学报, 13(4): 70-74.
- 聂永安, 巴振宁, 聂瑶. 2010. 深埋电极的地电阻率观测研究[J]. 地震学报, 32(1): 33-40.
- 孙承德, 顾贞庆, 钟国芬, 等. 1998. 莒县深井电阻率异常与地震[J]. 地震研究, 21(3): 277-281.
- 孙承德, 顾贞庆, 钟国芬. 1996. 深井电阻率所处井孔位置与地震关系的研究[J]. 西北地震学报, 18(4): 74-76.
- 谭大诚, 杜学彬, 马占虎, 等. 2005. 稳流源与地电阻率观测系统可靠性的关联[J]. 地震研究, 28(2): 202-206.
- 田山, 刘允秀, 聂永安, 等. 2009. 地震地电阻率观测改进方法研究——电测井技术的移植应用与数值模型分析[J]. 地震学报, 31(3): 272-281.
- 王帮本, 刘永兰, 李验轩. 1981. 深井电阻率与地震预报[J]. 地震研究, 4(4): 398-403.
- 王兰炜, 朱旭, 朱涛, 等. 2011. 地电阻率多极距观测系统及试验研究[J]. 地震, 31(1): 20-31.
- 尹相好, 田凤东, 赵庆红, 等. 2010. 山东莒县深井电阻率资料分析[J]. 防灾减灾学报, 26(2): 70-74.
- 张新基, 赵仪全, 刘耀炜, 等. 2005. 甘肃省地震监测志[M]. 甘肃: 兰州大学出版社.
- 赵洁, 杜学彬, 马世虎, 等. 2008. 嘉峪关地震台地电阻率观测效能评价[J]. 地震地磁观测与研究, 29(6): 76-82.
- 国家地震局. 1986. 地电台站观测技术规范[M]. 北京: 地震出版社.

# Introduction and Analysis of Geo-electrical Observation System in Underground Well at Tianshui Station

YANG Xing-yue, YANG Li-ming<sup>2</sup>, KANG Yun-sheng<sup>2</sup>, AN Hai-jing<sup>2</sup>,  
HAO Zhen<sup>2</sup>, WU Yin<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. *Tianshui Center Seismic Station, Earthquake Administration of Gansu Province, Tianshui 741020, Gansu, China*)  
(2. *Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

## Abstract

We introduce the field layout, measuring items design, the installation technology specification and the construction essentials of geo-electrical observation system in underground well in Tianshui Station, then compare and analyze the observed data between original observation and new system. The result shows that application of the geo-electrical observation system in underground well can improve the signal-to-noise ratio and ease the confliction between the land of geo-electrical observation and the economic construction. Given the situation that the geo-electrical observation environment is interfered by economic construction increasingly, the geo-electrical resistivity observation in underground well is a new way.

**Key words:** underground well observation; geo-electrical observation; geo-electrical resistivity; Tianshui Station