

天水地电阻率地表与井下多种观测方式的试验分析^①

康云生¹, 安海静¹, 马可兴¹, 谭大成^{1,2}

(1. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州地球物理国家野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:2011 年初天水地震台建成井下地电阻率观测专项项目, 将地电水平观测推向了立体观测, 其观测方式包括地表水平观测井下百米水平观测、地表与井下互换观测等。通过近两年的持续观测, 地表 A、B 供电井下 M、N 观测以及井下水平观测两种方法获得的数据相对稳定、可靠; 同时地表 A、B 供电井下 M、N 观测有助于数据变化的可靠性分析。在电磁环境较复杂的观测场地, 地表 A、B 供电井下 M、N 观测和井下水平观测可能是地电阻率观测较为有效的两种方法。

关键词: 甘肃天水; 地电阻率; 井下观测; 地表对比观测; 电极互换试验

中图分类号: P631.3⁺22

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2013)01-0190-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.01.0190

Test Analysis on Geoelectrical Resistivity Observation Combining the Surface and Deep-well Methods at Tianshui Seismic Station in Gansu Province

KAN Yun-sheng¹, AN Hai-jing², MA Ke-xing¹, TAN Da-cheng^{1,2}

(1. Earthquake Administration of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. Lanzhou National Observatory of Geophysics, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: In early 2011, Tianshui seismic station of Gansu province developed a special project for observation on deep-well geoelectrical resistivity, which pushed the horizontal geoelectrical observation to stereo observation. The methods include surface horizontal observation, deep-well horizontal observation, and the electrode interchange-able test between surface and deep-well observation. Through continuous observation in past two years, data obtained by two methods which are deep-well M、N observation supplied power by surface A、B and deep-well horizontal observation is relatively stable and reliable. Meanwhile, deep-well M、N observation supplied power by surface A、B could contribute to reliability analysis on data changes. At observation sites where electromagnetic environment is more complex, deep-well M、N observation supplied power by surface A、B and deep-well horizontal observation may be two effective methods.

Key words: Tianshui of Gansu province; Geoelectrical resistivity; Deep-well observation; Surface horizontal observation; Electrode interchangeable test

0 引言

应用地电阻率(也称“视电阻率”)法进行地震预测预报一直为研究地震中短期前兆信息的学者所关

注。孙正江^[1]、钱家栋^[2]指出在 20 世纪 60~80 年代, 前苏联巴尔苏科夫、日本山崎良雄、美国马泽拉和莫里森等发现了一些地震前地电阻率的异常变化

① 收稿日期: 2013-03-20; 中国地震局兰州地震研究所论著编辑: LC2013016

基金项目: 中国地震局“地震科技星火计划”项目(XH1025)

作者简介: 康云生(1954—), 男(汉族), 高级工程师, 从事地震地电研究和地震监测工作。

通讯作者: 马可兴, E-mail: xtaolake@163.com

现象。1967 年赵玉林等在河北首次建立了我国的地电阻率模拟观测台站;1984 年前后赵家骝研制了我国最早的数字化地电仪;1976 年唐山发生 $M_s 7.8$ 地震,昌黎等台站地电阻率在此 2、3 年前就出现显著的趋势性下降异常现象^[2];2008 年汶川发生 $M_s 8.0$ 地震,钱家栋^[3]、杜学彬^[4]在研究台站观测数据中发现成都等台站地电阻率同样有类似的变异现象。

2004 和 2006 年我国地震地电阻率台站环境技术要求^[5]、建设规范^[6]相继颁布。到 2012 年底基本按照这些要求和规范运行的地电阻率台站接近 70 个。近年来我国城市化建设发展迅速,许多地电阻率台站附近出现了电气化铁路、高压输电线路、金属管线网以及大功率用电设备等,这容易在观测场地形成不确定的影响^[7-12],以及工频、流散电流的干扰^[13-15]。

在电磁环境复杂的场地多种因素都可能造成地电阻率数据变异。为落实其原因,通常需要检查台站的电磁环境、观测系统等,但有时这些措施并不能完全及时有效。为此近年江苏海安、陕西合阳等台站先后开展了地电阻率井下观测,其数据的稳定性等方面有提高。但其观测方法除电极埋设更深外,

其它依然应用地表的四极对称方式。2011 年初甘肃天水台站开展了地表、井下多种观测方式的试验,其中包括地表、井下电极的互换观测方式,这不同于在同一水平面开展四极对称观测的常规方式,同时井下电极埋设深度达到了 100 m。本文介绍该试验的内容和方法,并对实验结果和数据可靠性进行分析。

1 地表与井下多种观测方式的原理

我国的地电阻率观测采用四极对称的布局方式,通常这种布局的 4 个电极排列在地表的一条直线上,并且四个电极对中心 O 点对称排列,如图 1(a)所示。从地表埋设的 $A、B$ 两个电极向大地输出稳定的直流电流 I ,在 $M、N$ 两个电极上获取供电时的电位差 ΔV ,则在地表观测到的地电阻率 ρ_s 为^[2]

$$\rho_s = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

式(1)中 K 是装置系数,它取决于 $A、B、M、N$ 四个电极的排列。

图 1(a)所示的四极对称方法测量得到的地电阻率 ρ_s ,通常并不是地表浅层介质的真正电阻率,只是探测区内介质电性的综合反映,即所谓的视电阻

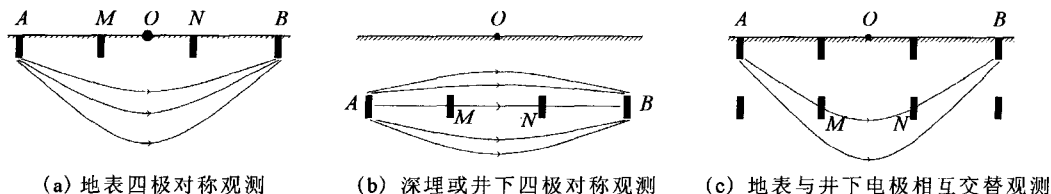


图 1 地电阻率的多种四极观测方式

Fig. 1 Various quadrupole symmetry observation methods of geoelectrical resistivity.

率^[2]。如果地下介质在相当大的范围内较均匀,则测量结果会非常接近地下介质的真正电阻率^[2,16-17]。

图 1(b)所示的四极对称方法是测量地电阻率的井下观测方法。如果电极埋设 10 余米深,通常可以称为深埋观测方式,若埋设深度达到数十米或更深时,一般可称为井下观测。近年来有部分台站开展了这种观测。依据目前的研究进展,该方法对地表的干扰因素有一定的抑制作用,但取决于场地的电性结构、层参数等^[18]。

图 1(c)所示的地电阻率测量方法是天水台站开展的尝试,即地表与井下电极互换的观测方法。其原理是地表 $A、B$ 电极供电时,使用井下 $M、N$ 电极测量;或由井下 $A、B$ 供电,地表 $M、N$ 测量。依

据这一原理,或可称其为“偶极互换”观测方式。

2 天水台站地表与井下多种观测方法并用的装置系统

天水地电阻率观测场地位于天水甘泉物流园,在崖湾村与白石村之间的永川河 I、II 级河谷阶地上。依据建台的原始资料,第四系覆盖层厚度约 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。场地的海拔 1 153 m,年平均湿度约 63%,年平均温度 18℃。

近年以来台站周边的电磁环境恶化。为探寻台站地电阻率能继续有效观测的方法,2010 年对台站观测系统进行了改造,观测场地依然保持原址。

2.1 装置系统的布设

为探寻同场地的地电阻率多种观测方法及数据

特点,甘肃天水台站在 2010 年的改造中采用了地表与井下多种观测方法并用的方式。

天水地表、井下电阻率观测系统由 20 个测道(测项分量)组成。图 1(a)所示的地表四极对称方式有 3 个测道;图 1(b)所示的井下水平观测也有 3 个测道;图 1(c)所示的地表与井下电极互换观测使用了 12 个测道;垂直观测使用 1 个测道;检测使用 1 个测道。

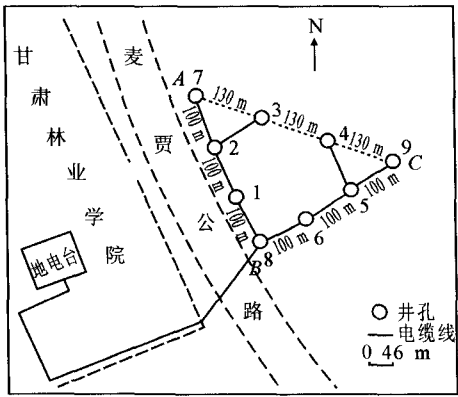


图 2 天水观测场地、井孔位置、地埋线路走向的布局图

Fig. 2 The layout of observation site, borehole location, line alignment at Tianshui station.

天水台站观测场地的地形地貌、周边环境、装置

系统布局如图 2 所示,测量仪器采用多极距地电仪(ZD8MI),外线路为地理方式。从图 2 可知,天水台站电极布设与正南北、东西方位有偏移。其地表电极埋深 6 m,井下电极埋深 100 m。NS、EW 测向 AB 极距为 300 m,MN 极距为 100 m,NW 测向 AB 极距为 390 m,MN 极距为 130 m。为与多极距仪器(ZD8MI)线路接入序号对应(见表 1),电极编号取 1~24。地表电极编号见图 2 所示;井下电极编号见图 3。

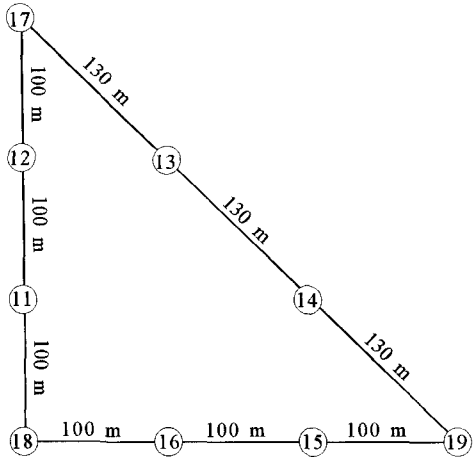


图 3 井下电极布设、编号示意图

Fig. 3 Diagram of deep-well electrodes layout and numbers.

表 1 天水地电阻率台站地表、井下电极的序号表
Table 1 The sequence listings of surface and deep-well electrodes at Tianshui geoelectrical resistivity station

测项	通道号	供电极		测量极		装置系数 K
		A	B	M	N	
地表水平观测	01(NS)	7	8	2	1	628
	02(EW)	8	9	6	5	628
	03(NW)	7	9	3	4	817
井下水平观测 (目标测项)	04(NS)	17	18	12	11	1 257
	05(EW)	18	19	16	15	1 257
	06(NW)	17	19	13	14	1 634
地表与 井下 电极 互 换 观 测	07(NS)	7	8	12	11	1 208
	08(EW)	8	9	16	15	1 208
	09(NW)	7	9	13	14	1 253
井 下 地 表 MN 测	10(NS)	17	18	2	1	1 208
	11(EW)	18	19	6	5	1208
	12(NW)	17	19	3	4	1253
地 表 AB 供	13(NS)	7	8	17	18	459
	14(EW)	8	9	18	19	459
	15(NW)	7	8	17	18	418
井 下 地 表 AB 供	16(NS)	17	18	7	8	459
	17(EW)	18	19	8	9	459
	18(NW)	17	18	7	8	418
纵向观测	19	8	18	10	20	
精度跟踪验证	20	21	24	22	23	2 000

需指出,图 3 中井下编号与对应位置的地表电极在同一井孔内。例如,地表编号 8 电极与图 3 中的编号 18 电极就在一个井孔中。

2.2 装置系统的检测原理与方法

按照地电观测规范要求,地表、井下的导线绝缘性能需要具有可检测性^[6]。为此在天水地电阻率地表与井下的多种观测方式系统中利用了深井的资源,在垂直方向增加了两个辅助电极。例如在图 2 中编号为 8、图 3 中编号为 18 的电极之间增加了编号为 10、20 的检测电极,各电极间距为 32 m,这样 4 个电极组成了一个垂向四极对称系统。图 4 为检测电极的原理示意图。

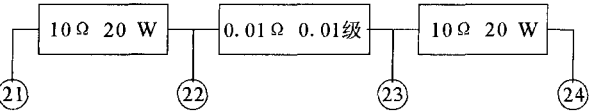


图 4 检测电极的原理示意图

Fig. 4 The schematic graph of detection electrodes.

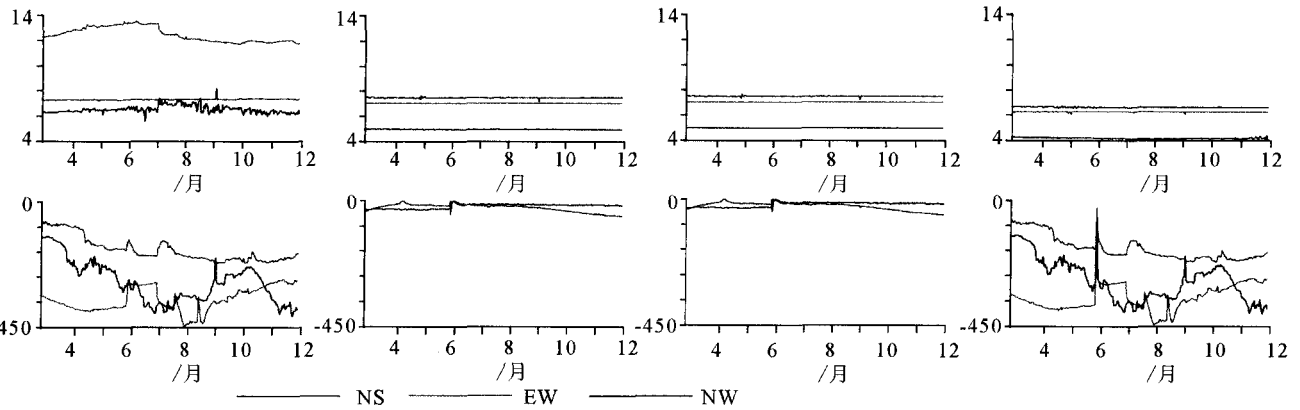


图 5 不同观测方式典型的原始数据曲线(2011 年 3 月 27 日~12 月 27 日)

Fig. 5 Typical raw data curves of different observation methods (March 21, 2011— December 27, 2011).

测量过程中对应的自然电位差 V_{SP} 测量值。图 5 表明井下观测的目标测项——井下 NS、EW、NW 向观测结果 ρ_s 为最好;地表水平观测的 ρ_s 、 V_{SP} 的稳定性相对最差;井下 A、B 供电,地表 M、N 测量时, ρ_s 值较稳定,但 V_{SP} 的稳定性与地表水平观测接近;井下水平观测和地表 A、B 供电井下 M、N 测量两种方式的 ρ_s 、 V_{SP} 值最接近。

表 2 天水台站地电阻率不同观测方式的误差统计(2011 年 3 月 27 日~12 月 27 日)

Table 2 Error statistics for different observation methods of geoelectrical resistivity at Tianshui seismic station (March 21, 2011— December 27, 2011)

	地表水平观测				井下水平观测				地表 AB 供电井下 MN 测量				井下 AB 供电地表 MN 测量			
误差	NS	EW	NW	均值	NS	EW	NW	均值	NS	EW	NW	均值	NS	EW	NW	均值
均方差	0.037	0.020	0.020	0.026	0.007	0.000	0.030	0.012	0.006	0.002	0.019	0.009	0.062	0.029	0.027	0.039
相对均方差	0.570	0.129	0.220	0.306	0.131	0.023	0.358	0.171	0.161	0.037	0.351	0.078	0.937	0.463	0.656	0.685

2.3 观测时间点的选取

在天水地电阻率地表与井下多种观测方式的实际观测中,考虑到了每日场地电磁干扰最小的时段可能在 03、04 时左右,因此在这一时段进行各测道地电阻率观测。通常在电磁干扰相对严重的场地,每日 03、04 时基本可避开人为活动产生的电磁干扰和影响;同时这期间来自空间的电磁扰动的影响也相对较低^[19-20]。

3 不同观测方式的数据变化特征

天水地电阻率地表与井下多种观测方式系统实际上采用了地表水平观测、井下水平观测、地表与井下电极互换观测三种方式。自 2011 年初开始观测以来三种观测方式基本保持了各自的数据特点,图 5 是这三种观测方式典型的数据变化情况。

图 5 上面一排分图是三种测量方式在 NS、EW、NW 测向的地电阻率 ρ_s 值,下面一排分图是其

同时图 5 说明在同一场地测量地电阻率 ρ_s 值时,采用不同测量方法, ρ_s 值有明显差异。这主要是采用不同的观测方法时,一方面装置系数 K 不同(表 1);另一方面测量过程中人工电位差 ΔV 有差异,这主要与人工电流场的分布差异相关^[2,12,16-17];三是电极处于不同水平面时的电磁影响环境不同。

从表2可见,地表水平观测和井下A、B供电地面M、N测量这两种方式的数据误差相对大,而地表A、B供电井下M、N测量和井下水平观测两种方式的数据误差相对小。需指出,井下A、B供电地面A、B测量和地面A、B供电井下A、B测量这两种方式其 ρ_s 、 V_{SP} 的稳定性、误差与表2后面三种方法比较都差。

此外,在图5(a)中的6月底、7月初,地表水平观测的 ρ_s 值有明显的跃变现象,但井下水平观测、地表与井下电极互换观测均没有出现这一变异现象。表明地表水平观测 ρ_s 值的这次跃变可能更多来自地表的影响。

4 结论

在地电阻率多种观测方式系统中,同场地进行的地表水平观测、井下水平观测、地表与井下电极互换观测三种方式中,前两种是常用的对称四极观测方法,而地表与井下电极互换观测实际是一种偶极观测方式。近两年的观测数据表明,井下水平观测能抑制地面电磁干扰,观测效能最好。地表、井下电极互换观测(或偶极互换)方法通过近两年的有效观测,其中地表A、B供电井下M、N测量的方法数据比较稳定性,结果基本与井下水平观测接近或稍好,它的原理可能有助于分析数据变异的性质。

天水台站的电极互换观测(或偶极互换)方式,其观测数据的分析应用还需要一个探索的过程,这一方式可能为地震地电阻率的装置建设提供了一种有益尝试。

致谢:感谢中国地震局地震预测研究所赵家骝研究员、甘肃省地震局袁道阳、杨立明研究员和西部强震研究室多位专家的支持,感谢天水台站领导和监测人员的配合与支持。

[参考文献]

- [1] 孙正江,王华俊.地电概论[M].北京:地震出版社,1984:187-192.
SUN Zheng-jiang, WANG Hua-jun. An Introduction to Geoelectrics[M]. Beijing: Seismological Press, 1984: 187-192.
- [2] 钱家栋,陈有发,金安忠.地电阻率法在地震预报中的应用[M].北京:地震出版社,1985:226-266.
QIAN Jia-dong, CHEN You-fa, JIN An-zhong. The Application of Geoelectric Resistivity in Earthquake Prediction[M]. Beijing: Seismological Press, 1985: 226-266.
- [3] 钱家栋,马钦忠,李劲秋.汶川Ms8.0地震前成都台NE测线地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 Research on Anomalies of NE Survey Line at Chengdu Seismic Station before the Wenchuan Ms8.0 Earthquake[J]. Earthquake Science, 2013, 35(1): 4-17.
- [4] 杜学彬.在地震预报中的两类视电阻率变化[J].中国科学(D),2010,40(10):1321-1330.
DU Xue-bin. Two types of Changes in Apparent Resistivity in Earthquake Prediction[J]. Science China (D), 2010, 40(10): 1321-1330.
- [5] 钱家栋,顾左文,赵家骝,等.地震台站观测环境技术要求第2部分:电磁观测.中华人民共和国国家标准[S].北京:中国标准出版社,2004:14-29.
QIAN Jia-dong, GU Zuo-wen, ZHAO Jia-liu, et al. Technical Requirements of Seismic Station Observation Environment, Part 2: Electromagnetic Observation. The national standard of the People's Republic of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 14-29.
- [6] 杜学彬,席继楼,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.中华人民共和国地震行业标准[S].2006:2-5.
DU Xue-bin, XI Ji-lou, TAN Da-cheng, et al. Construction Specification of Seismic Station, Geoelectrical Station, Part 1: Geoelectrical Resistivity Station. DB of the People's Republic of China[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006: 2-5.
- [7] 方炜,晏锐,邵辉成,等.高压直流输电对地磁场观测的影响[J].地震地质,2012,34(1):138-144.
FANG Wei, YAN Rui, SHAO Hui-cheng, et al. Study on the Impact of HVDC to Geoelectric Field Observation[J]. Seismology and Geology, 2010, 34(1): 138-144.
- [8] 方炜,张国强,邵辉成.高压直流输电对地电场观测的影响[J].地震地质,2010,32(3):434-441.
FANG Wei, ZHANG Guo-qiang, SHAO Hui-cheng. Study on the Impact of HVDC to Geomagnetic Field Observation[J]. Seismology and Geology, 2010, 32(3): 434-441.
- [9] 张秀霞,李飞,杨冯威,等.蔬菜大棚对新沂地震台地电阻率的影响[J].地震地磁观测与研究,2009,30(增):32-36.
ZHANG Xiu-xia, LI Fei, YANG Feng-wei, et al. Influence of Green House on Geoelectrical Resistivity at Xinqi Seismic Station[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2009, 30(supp): 32-36.
- [10] 卫定军,李春贵.搭建蔬菜大棚对固原地电台视电阻率观测影响的分析[J].地震地磁观测与研究,2009,30(2):77-82.
WEI Ding-jun, LI Chun-gui. Analysis about Influence of Green House on Apparent Resistivity Observation at Guyuan Seismic Station[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2009, 30(2): 77-82.
- [11] 张新基,赵仪全,刘耀炜,等.甘肃省地震监测志[M].甘肃:兰州大学出版社,2005.
ZHANG Xin-ji, ZHAO Yi-quan, LIU Yao-wei, et al. Seismic Monitoring Log in Gansu Province[M]. Gansu: Lanzhou University Press, 2005.
- [12] 解滔,杜学彬,陈军营,等.井下地电阻率观测中地表电流干扰影响计算[J].地球物理学进展,2012,27(1):112-121.

- XIE Tao, DU Xue-bin, CHEN Jun-ying, et al. Calculation for the influence from the surface disturbance current in the deep-well geoelectrical resistivity observation[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 112-121.
- [13] 谭大诚. 地电观测中工频干扰的分析[A]//石特临, 陈有发, 李清河. 地震地电学发展与展望[G]. 兰州: 兰州大学出版社, 1998: 176-183.
- TAN Da-cheng. Analysis on Powerline Interference in the Geoelectric Observation[A]//SHI Te-lin, CHEN You-fa, LI Qing-he. Development and Prospects of Seismic Geoelectrics [G]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1998: 176-183.
- [14] 谭大诚, 苏明达, 张世中, 等. 地电仪工作可靠性和抗干扰的研究[J]. 西北地震学报, 2000, 22(2): 177-181.
- TAN Da-cheng, SU Ming-da, ZHANG Shi-zhong, et al. Study on Reliability and Anti-interference Capacity of Digital Geoelectrical Equipment[J]. Northwestern Seismological Journal, 2000, 22(2): 177-181.
- [15] 谭大诚, 杜学彬, 马占虎, 等. 稳流源与地电阻率观测系统可靠性的关联[J]. 地震研究, 2005, 28(2): 202-206.
- TAN Da-cheng, DU Xue-bin, MA zhan-hu, et al. Effect of Regulated Current Supply on the Reliability of Apparent Resistivity Measuring System[J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(2): 202-206.
- [16] 国家地震局科技监测司. 地震电磁观测技术[M]. 北京: 地震出版社, 1995: 39-49.
- Technology and Monitoring Department, State Earthquake Administration. Seismic Electromagnetic Observation Techniques[M]. Beijing: Seismological Press, 1995: 39-49.
- [17] 中国地震局监测预报司. 地震电磁学理论基础与观测技术(试用本)[M]. 北京: 地震出版社, 2010: 18-126.
- Monitoring and Predicting Department, China Earthquake Administration. Theoretical Basis and Observation Techniques of Seismic Electromagnetics (Trial edition)[M]. Beijing: Seismological Press, 2010: 18-126.
- [18] 解滔, 杜学彬, 陈军营, 等. 井下地电阻率观测中地表电流干扰影响计算[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 112-121.
- XIE Tao, DU Xue-bin, CHEN Jun-ying, et al. Calculation for the influence from the surface disturbance current in the deep-well geoelectrical resistivity observation[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 112-121.
- [19] 解滔, 杜学彬, 郑国磊, 等. 水平两层均匀介质中井下电阻率观测信噪比的理论计算[J]. 西北地震学报, 2012, 34(1): 18-22.
- XIE tao, DU Xue-bin, ZHENG Guo-lei, et al. Theoretical Calculation for the Signal Noise Ratio of the Underground Electric Resistivity Observation in the Two-layered Horizontal Homogeneous Medium[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(1): 18-22.
- [20] 徐文耀. S_q 发电机电流的逐日变化和 S_q 指数[J]. 地球物理学报, 1992, 35(6): 676-683.
- XU Wen-yao. Day-to-day Variability of the S_q Dynamo Currents and S_q Index[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1992, 35(6): 676-683.
- [21] 谭大诚, 赵家骝, 席继楼, 等. 潮汐地电场特征及机理研究[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 544-555.
- TAN Da-cheng, ZHAO Jia-liu, XI Ji-lou, et al. A Study on Feature and Mechanism of the Tidal Geoelectrical Field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 544-555.