

# 井下地电阻率观测中布极参数的确定方法\*

毛先进, 段 炜\*, 庄儒新, 杨玲英, 赵晋民

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:**为压制地电阻率浅层干扰、突出深部以地震预报为目的的有用信息,选取了小江断裂中段一个场点作为实例,研究了井下地电阻率前兆观测中确定电极埋深、电极间距等布极参数的方法。结果表明:选择井下地电阻率观测布极参数时要考虑影响系数和探测深度2个主要因素,即地下潜水位面以上各地层的影响系数应远小于深部各层,探测深度范围内最底层(受孕震影响最大的层)的影响系数应远大于其它各层,观测系统的探测深度最好不小于已有震例指示的地电阻率观测系统的探测深度。按照该方法选择了所给场点的井下地电阻率观测布极参数,即电极埋深200 m、供电极距1 050 m、测量极距350 m,按对称四极布置,可获得最佳观测效果。

**关键词:**地电阻率观测;布极参数确定方法;影响系数;探测深度

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)01-0096-06

## 0 引言

在国内50余年的地电阻率前兆观测中,1976年唐山7.8级、1988年澜沧—耿马7.6和7.2级、2008年汶川8.0级、2013年芦山7.0级等多次大地震以及一些中强地震之前,震中区周围300 km范围内的地电阻率资料都出现过中期异常变化,这表明地电阻率是一种比较可靠的地震前兆(赵玉林,钱复业,1978;钱家栋等,1985,2013;桂燮泰等,1989;叶青等,2005;张学明等,2009;Lu *et al.*, 1999;钱复业等,1980,1987;顾功叙,1981;张国明等,2001;杜学彬,2010)。但由于地下浅层介质电阻率受季节变化的影响,数据变化具有多源性,实际工作中难以确定数据变化的真实原因,这可能是这些大震发生前未能做出短期或临震预报的原因之一。因此寻求压制与地震孕育无关的浅层变化(本文称之为干扰)的观测方法成为必然,井下地电阻率观测是较为有效的方法之一。

近年来,我国陆续开展了井下地电阻率观测的理论研究与试验研究(王兰炜等,2015),已有研究结果表明井下观测优于传统的地表观测(张磊等,2015;高曙德,2016),是一种有前景的观测方法。目前国

内开展了井下地电阻率观测的台站中,不同台站的电极埋深和电极间距(简称为布极参数,用 $C$ 表示,下同)有很大差别,观测结果表明各台站压制浅层干扰的能力参差不齐。因此,如何确定布极参数有效压制浅层干扰,从而有效获取深部变化信息,是一个十分重要的问题。本文以小江断裂中段附近一个场点为例,以有效压制浅层干扰变化、获取深部有用变化信息为目的,研究井下地电阻率观测时最优布极参数的确定方法。

## 1 最优布极参数确定原则

### 1.1 影响系数

对于一维情形,假定地电阻率观测区是水平层状介质,共 $n$ 层,第 $i$ 层电阻率为 $\rho_i$ ,层厚为 $h_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ),且假定底层的层厚无限大,即 $h_i \rightarrow \infty$ 。在地表或地下四极对称装置观测到的视电阻率 $\rho_s$ 既是地下各层电阻率和层厚的函数,同时也是布极参数的函数,即:

$$\rho_s = f(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n; h_1, h_2, \dots, h_{n-1}; C) \quad (1)$$

式中: $C$ 代表布极参数。

假定各层只是地电阻率发生变化,层厚保持

\* 收稿日期: 2017-11-07.

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH16034)和云南省地震局科技人员传帮带培养项目(C3-201705)“地电阻率台站前兆信息获取能力评价及其改进方法研究”(C3-201705)联合资助。

♣ 通讯作者: 段炜(1982-), 工程师, 主要从事水库地震监测及活动性的研究. E-mail: 26135568@qq.com.

不变。由式(1)可以得到：

$$\frac{d\rho_s}{\rho_s} = S_1 \frac{d\rho_1}{\rho_1} + S_2 \frac{d\rho_2}{\rho_2} + \cdots + S_n \frac{d\rho_n}{\rho_n} \quad (2)$$

式中： $S_i = \frac{\rho_i}{\rho_s} \frac{\partial f}{\partial \rho_i}$ ，称为影响系数，它是在给定的布极参数下，第*i*层地电阻率变化率对观测值变化率的贡献权系数，由介质电性参数和布极参数共同决定。

Seigel (1959) 已证明影响系数之和等于1，某些层的影响系数之和增大，其余层的影响系数之和就会减小。由式(2)可见，通过控制影响系数在各层的分配就能压制或突出某些层变化信息。近年来，关于水平层状介质、点源在地下或地表时各层介质影响系数的计算方法已开展了逐步深入的研究(聂永安等, 2009, 2010; 毛先进等, 2014; 解滔等, 2016)，为影响系数的计算打下了良好的基础。

由于地下潜水位受大气降雨、灌溉、抽水等因素影响而随时间波动，因此潜水面以上各层介质含水量随之波动，这些地层的地电阻率也发生波动，使观测到的视电阻率发生变化，因这种变化与地震孕育无关而称之为干扰；数十年的地电阻率观测资料表明这种波动大致具有一年周期，但波形并不规则(杜学彬等, 2017)，仅用数学手段并不能很好地消除其影响；从地电阻率观测目的看，这些层位的影响系数越小越好。有关研究(毛先进等, 2014; 解滔等, 2016)表明，随着电极埋深(布极参数之一)的变化，各层影响系数并非单调变化，而是呈现起伏变化。在一定的电极间距下，电极埋设在一定深度范围内时对浅层干扰具有放大作用，换言之，井下地电阻率观测时布极参数须有所选择。笔者认为，要达到有效压制浅层干扰、有效获取深部有用信息的目的，应当使“深部地层”的影响系数明显大于易受干扰的浅部地层的影响系数。

## 1.2 探测深度

直流电阻率观测的依据是电流的体积效应，在井下观测时，前述“深部地层”实际上是电流分布区域中靠下的部分，这一部分的深度多少合适，应该由其电阻率的变化能够反映地震的孕育和发展过程并且能被观测到来确定，因此涉及探测深度问题。

关于点源在地下或地表时的探测深度，我们采用赵和云和钱家栋(1982)给出的探测深度的定义，利用二维边界积分方程法对几种典型电阻率结构做初步研究，得到了关于探测深度的一些有益的认识(毛先进等, 2017)。本文研究针对的是一维电性结构，因此采用相同的探测深度的定义，但点源电场的计算采用一维方法(葛为中, 1994)。

我国(地表)直流地电阻率前兆观测的供电电极距一般为1 000 m，50余年的观测经验表明，这样的观测装置其探测深度范围内电阻率的变化是能够反映大地震的孕育和发展过程，且能被观测到的。对于这样的装置和较为常见的电阻率水平分层均匀结构，下伏低阻与下伏高阻结构探测深度分别约为550 m与300 m(毛先进等, 2017)，井下地电阻率观测时最好不小于这样的深度。同时，在电极埋深方面还应考虑建设成本和技术可行性。

## 2 布极参数确定实例

### 2.1 场点选择

本文研究的场点位于小江断裂带中段西支附近(图1)。小江断裂带北起巧家以北，南至建水东南，全长超过400 km，其形成时代较早、发育历史长，经历过多期构造活动。新构造时期以来，该断裂活动表现为强烈的左旋走滑运动以及两侧断块垂直差异活动，沿断裂地震活动强烈。这些活动表明断裂附近有利于构造应力积累，而应力积累过程中地下介质的变形会导致其电阻率发生变化，因此选择在小江断裂带中段开展压制浅层非震变化、有效获取深部构造运动变化信息的井下地电阻率观测方法研究是合适的。

### 2.2 布极参数确定

通过电测深获得场点的一维电阻率结构，见表1。该场点按电阻率分为6层，为下伏低阻结构，电测深测线方向为南北向。

该场点位于嵩明盆地，1~3层介质厚度之和为28.1 m。根据参考场点附近多个岩土工程勘察报告，该场点地下潜水位随季节变化，雨季0.2 m，旱季不超过10 m，因此干扰(潜水位变化对介质电阻率的影响)主要发生在1~3层，4~6层则不受影响。按照前述原则，确定布极参数时应使1~3层的影响系数之和尽量小，而4~6层影响系数之和则尽量大。

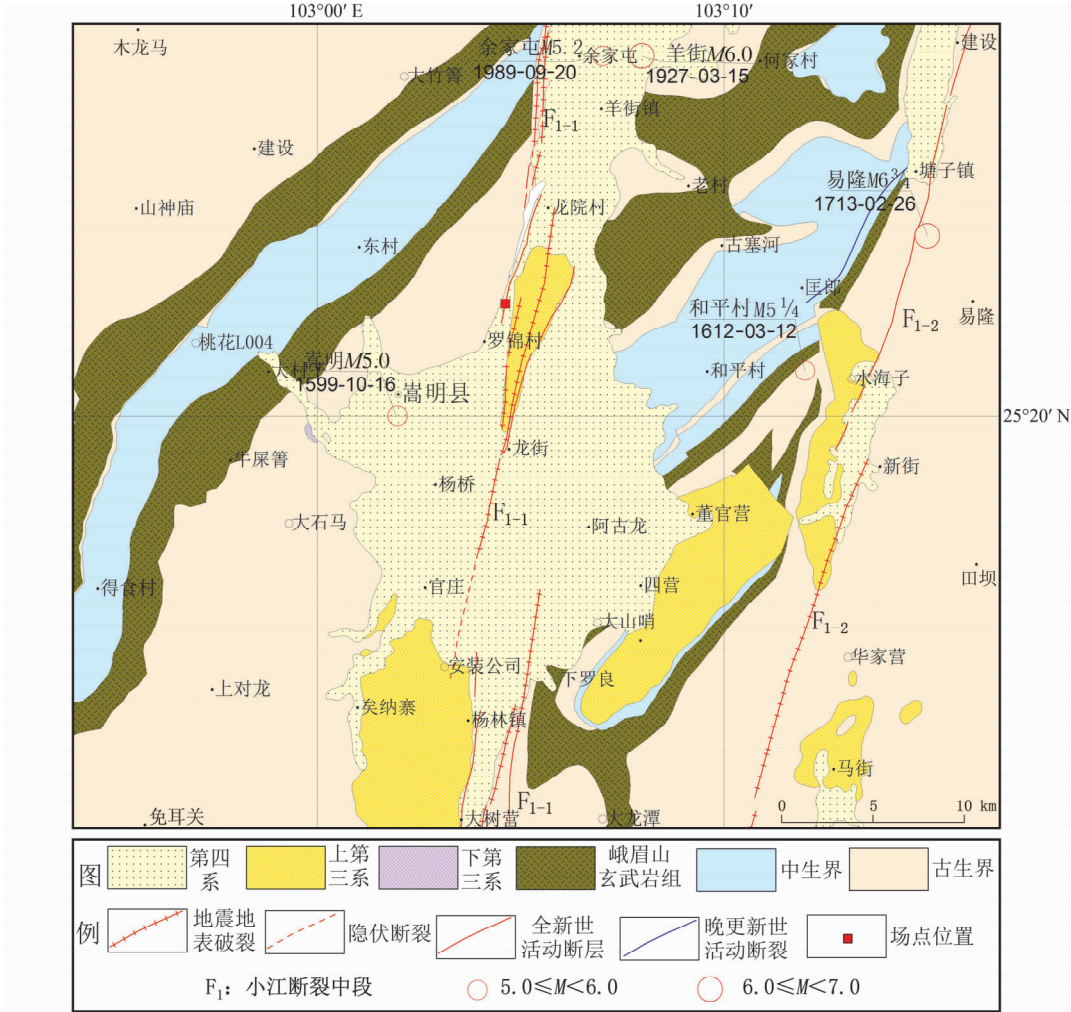


图 1 研究场点的位置  
Fig. 1 The location of the studied site

表 1 研究场点一维电阻率结构参数  
Tab. 1 Parameters of the one-dimensional resistivity structure of the studied site

层号	层厚/m	电阻率/ $\Omega \cdot \text{m}$
1	2.3	39.0
2	3.8	52.0
3	22.0	18.0
4	38.0	642.0
5	171.0	58.0
6	$\infty$	20

由于影响系数随电极埋深的变化很复杂（毛先进等，2014；解滔等，2016），本文仅针对具体的电极埋深进行讨论。

表 2 是电极埋深 2 m（我国大多数地面地电

阻率观测台站的电极埋深）、不同电极间距条件下各层介质的影响系数和探测深度计算结果，其中  $AB$ ， $MN$  分别为供电极距与测量极距， $S_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) 为 1 ~ 6 层介质影响系数。从表 2 可见，在 8 种大小不同的电极距中，1 ~ 3 层介质（干扰层）的影响系数随  $AB$  增大而减小；干扰层之下的 4 ~ 6 层介质的影响系数随  $AB$  增大而增大，同时探测深度也随  $AB$  增大而增大。当  $AB = 150 \text{ m}$  时，1 ~ 3 层介质的影响系数之和为 0.903 1，4 ~ 6 层的为 0.096 7，前者是后者的 9.3 倍，观测数据的变化主要反应 1 ~ 3 层介质的干扰；当  $AB = 1200 \text{ m}$  时，1 ~ 3 层介质的影响系数之和为 0.070 4，4 ~ 6 层的为 0.929 3，后者是前者的 13.2 倍，对压制 1 ~ 3 层的干扰变化很有利，而且探测深度达到 579.6 m。但由于 4 ~ 6 层的影响系数分别为 0.572 7，0.242 4，0.114 2，观测系

统对底界面埋深只有 66.1 m 的第 4 层最敏感，而对其探测深度范围内受孕震影响最大的第 6 层则不够敏感；另外工业电磁干扰对地表观测的影响是最大的。综合来看，对于该场点，即使供电电极距达到 1 200 m，地表浅埋电极的观测方式也难以达到地震前兆观测的目的。

表 2 电极埋深 2 m、不同电极间距时各层介质的影响系数和探测深度  
Tab. 2 The influence coefficients and probe depths of each layer at electrode depth of 2 m in different electrode spacing

电极距		影响系数							探测深度
AB/m	MN/m	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	∑ S <sub>i</sub>	D/m
150	50	0.035 2	0.050 6	0.817 3	0.084 1	0.011 6	0.001 0	0.999 8	24.1
300	100	0.032 7	0.041 6	0.697 0	0.184 2	0.039 4	0.004 7	0.999 6	30.0
450	150	0.026 9	0.034 4	0.576 7	0.275 5	0.074 4	0.011 7	0.999 6	137.5
600	200	0.021 3	0.027 4	0.460 3	0.355 9	0.111 8	0.022 9	0.999 6	260.4
750	250	0.016 0	0.020 7	0.350 1	0.425 5	0.148 7	0.038 6	0.999 6	345.3
900	300	0.011 0	0.014 5	0.247 0	0.484 5	0.183 4	0.059 0	0.999 6	426.9
1 050	350	0.006 4	0.008 8	0.151 7	0.533 5	0.214 9	0.084 3	0.999 6	505.0
1 200	400	0.002 2	0.003 6	0.064 6	0.572 7	0.242 4	0.114 2	0.999 7	579.6

表 3 是电极埋深 150 m、不同电极间距条件下各层介质的影响系数和探测深度计算结果。从表中可见，在 8 种大小不同的电极距中，第 1~3 层介质（干扰层）的影响系数之和随 AB 增大而增大，当 AB=1 200 m 时为 0.088 1，第 4~6 层介质的影响系数之和最小，为 0.911 7，后者是前者的 10.3 倍，对 1~3 层的干扰变化有较好的压制能力；当 AB=150 m 时，第 1~3 层介质的影响系数

之和仅为 0.002，第 4~6 层的为 0.998，后者是前者的 499.0 倍，对压制 1~3 层的干扰变化十分有利。

仅从影响系数看，表 3 中所有电极间距方案都可以考虑，然而不同方案的探测深度差异很大，当 AB=150 m 时探测深度只有 194.9 m，远达不到现有震例所指示的探测深度要求；只有最后 2 种方案达到探测深度不小于 550 m 的要求。

表 3 电极埋深 150 m、不同电极间距时各层介质的影响系数和探测深度  
Tab. 3 The influence coefficients and probe depths of each layer at electrode depth of 150 m in different electrode spacing

电极距		影响系数							探测深度
AB/m	MN/m	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	∑ S <sub>i</sub>	D/m
150	50	0.000 1	0.000 1	0.001 8	0.009 9	0.963 9	0.024 2	1.000 0	194.9
300	100	0.000 5	0.000 6	0.010 9	0.039 2	0.834 2	0.114 5	0.999 9	237.6
450	150	0.001 3	0.001 6	0.026 7	0.060 1	0.680 7	0.229 5	0.999 9	300.6
600	200	0.002 2	0.002 6	0.044 9	0.062 7	0.542 8	0.344 6	0.999 8	366.9
750	250	0.002 9	0.003 6	0.061 4	0.051 3	0.430 3	0.450 2	0.999 7	434.4
900	300	0.003 5	0.004 3	0.073 1	0.033 0	0.344 1	0.541 7	0.999 7	501.6
1 050	350	0.003 8	0.004 7	0.078 9	0.013 9	0.280 6	0.617 8	0.999 7	567.9
1 200	400	0.003 8	0.004 8	0.079 5	-0.002 5	0.234 7	0.679 5	0.999 8	632.7

表 4 是电极埋深 200 m、不同电极间距条件下各层介质的影响系数和探测深度计算结果。与表 2 类似，8 种大小不同的电极距下 1~3 层介质的影响系数之和随 AB 增大而增大，当 AB=1 200 m 时为 0.059 7，第 4~6 层介质的影响系数之和最大，

为 0.940 1，后者是前者的 15.7 倍，对 1~3 层的干扰变化有良好的压制能力；当 AB=150 m 时，第 1~3 层介质的影响系数之和仅为 0.000 6，第 4~6 层的为 0.999 3，后者是前者的 1 665.5 倍，对压制来自于 1~3 层的干扰变化非常有利。

从影响系数看,表4中所有电极距方案都符合要求,然而不同方案的探测深度差异很大,当 $AB=150\text{ m}$ 时,第5层介质的影响系数达到0.852 8,采用这种布极方案,其观测数据主要反映第5层的

变化,相应的探测深度只有240.6 m,尽管电极埋深200 m,依然达不到已有震例指示的探测深度要求。只有最后3种方案符合探测深度不小于550 m的要求。

表4 电极埋深200 m、不同电极间距时各层介质的影响系数和探测深度

Tab. 4 The influence coefficients and probe depths of each layer at electrode depth of 200 m in different electrode spacing

电极距		影响系数							探测深度
$AB/\text{m}$	$MN/\text{m}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$\sum S_i$	$D/\text{m}$
150	50	0.000 0	0.000 0	0.000 6	0.002 2	0.852 8	0.144 3	0.999 9	240.6
300	100	0.000 2	0.000 3	0.005 2	0.013 7	0.592 8	0.387 5	0.999 8	302.6
450	150	0.000 7	0.000 9	0.014 6	0.027 8	0.415 7	0.540 1	0.999 7	365.0
600	200	0.001 2	0.001 5	0.026 0	0.034 9	0.302 4	0.633 5	0.999 7	428.5
750	250	0.001 8	0.002 2	0.036 8	0.034 1	0.226 2	0.698 6	0.999 7	492.6
900	300	0.002 2	0.002 7	0.045 4	0.028 1	0.173 6	0.747 7	0.999 7	556.6
1 050	350	0.002 5	0.003 0	0.051 1	0.020 0	0.137 0	0.786 2	0.999 7	619.8
1 200	400	0.002 6	0.003 2	0.053 9	0.011 8	0.111 4	0.816 9	0.999 8	682.0

综合表3,4来看,从达到有效压制浅层非震干扰、获取深部有用信息的观测目的,建设成本以及技术可行性等方面综合考虑,该场点可选择埋深200 m、供电极距1 050 m、测量极距350 m的对称四极布置方案(表4),此时电阻率受地下水位影响最大的1~3层介质影响系数之和为0.056 6,4~6层影响系数之和为0.943 2,后者为前者的16.7倍,有良好的压制浅层干扰的能力,其探测深度为619.8 m,完全满足现有震例指示的地电阻率前兆观测系统的探测深度要求,而且受孕震影响最大的第6层的影响系数达到0.786 2,观测数据的变化将能包含更多的有用信息。

3 结论

压制浅层干扰、有效获取深部构造运动信息是包括地电阻率的所有地震前兆观测的目的。本文以小江断裂北段嵩明盆地内一个场点为例,计算并分析了不同布极参数条件下各层介质的影响系数及观测系统探测深度变化情况,对采用不同布极参数时压制浅层干扰、获取深部介质电阻率变化信息的能力进行了分析,研究表明:

(1) 对于给定的一维电阻率结构和不同布极参数的观测系统,可以首先用影响系数和探测深度这2个指标预判观测效果,然后通过选择合适的布极参数达到最佳观测效果。

(2) 分析表明,在确定井下电阻率地震前兆观测系统的布极参数时,首先应考虑影响系数分布,即地下潜水位面以上各地层的影响系数之和应远小于深部各层影响系数之和,同时还应使最下层(受孕震影响最大的层)的影响系数远大于其它各层的影响系数,其次要考虑观测系统的探测深度,最好不小于过去50余年已有震例指示的探测深度要求。

(3) 本文方法确定了在所选场点开展井下电阻率观测的最佳布极参数,即电极埋深200 m、供电极距1 050 m、测量极距350 m,按对称四极布置。

参考文献:

杜学彬,孙君嵩,陈军营. 2017. 地震预测中的地电阻率数据处理方法[J]. 地震学报,39(4):531-548.  
杜学彬. 2010. 在地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学:地球科学,40(10):1321-1330.  
高曙德. 2016. 深井地电观测技术在地震监测中的应用探讨[J]. 地球物理学进展,31(5):2078-2088.  
葛为中. 1994. 层状介质点源电场正演解析及其应用[J]. 地球物理学报,37(增刊1):534-541.  
顾功叙. 1981. 探索中的几类地震前兆的物理依据[J]. 西北地震学报,3(2):1-5.  
桂燮泰,关华平,戴经安. 1989. 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,11(4):71-75.  
解滔,杜学彬,卢军. 2016. 井下视电阻率观测影响系数分析[J]. 中国地震,32(1):40-53.

- 毛先进,杨玲英,钱家栋. 2014. 水平层状介质中深埋装置系统地电阻率影响系数特征研究[J]. 地震学报,36(4):678-685.
- 毛先进,杨玲英,赵晋民,等. 2017. 井地下电阻率观测的探测深度初步研究[J]. 地震学报,39(2):79-87.
- 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.
- 聂永安,姚兰予. 2009. 成层半空间深埋电极产生的电位分布[J]. 中国地震,25(3):246-255.
- 钱复业,赵玉林,许同春. 1987. 地电阻率季节干扰变化分析[J]. 地震学报,9(3):289-302.
- 钱复业,赵玉林. 1980. 地震前地电阻率变化十例[J]. 地震学报,2(2):186-197.
- 钱家栋,陈有发,金安中. 1985. 地电阻率法在地震预报中的应用[M]. 北京:地震出版社,227-248.
- 钱家栋,马钦忠,李劭栋. 2013. 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,35(1):4-17.
- 王兰炜,张宇,张世中,等. 2015. 我国井下地电阻率观测技术现状分析[J]. 地震地磁观测与研究,36(2):95-102.
- 叶青,杜学彬,陈军营,等. 2005. 2003 年大姚和民乐—山丹地震 1 年尺度预测[J]. 地震研究,28(3):226-230.
- 张国明,傅征祥,桂燮泰. 2001. 地震预报引论[M]. 北京:科学出版社,214-270.
- 张磊,乔子云,罗娜,等. 2015. 河北大柏舍台深井与浅层地电阻率观测对比分析[J]. 华北地震科学,33(4):49-53.
- 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[J]. 地震,29(1):108-115.
- 赵和云,钱家栋. 1982. 地电阻率法中勘探深度和探测范围的理论讨论和计算[J]. 西北地震学报,4(1):40-56.
- 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[J]. 地球物理学报,21(3):181-190.
- Lu J, Qian F Y, Zhao Y L. 1999. Sensitivity analysis of the Schlumberger monitoring array: application to changes of resistivity prior to the 1976 earthquake in Tangshan, China[J]. Tectonophysics, 307(3-4):397-405.
- Seigel H O. 1959. Mathematical formulation and type curves for induced polarization[J]. Geophysics, 24(3):547-565.

## Determination Method of the Buried Depths and Intervals of Electrodes for Borehole Geo-resistivity Observation

MAO Xianjin, DUAN Wei, ZHUANG Ruxin, YANG Lingying, ZHAO Jinmin  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

In view of the objective of suppressing shallow interference and highlighting the useful information from the depth, we selected a field site in the middle section of the Xiaojiang fault as an example, and developed a method for determining the parameters such as the buried depths and intervals of electrodes in the borehole geo-resistivity observation for seismic precursors. The research shows that two major factors, the influence coefficient and the probing depth, should be considered when selecting parameters for borehole geo-resistivity observation, namely the influence coefficients of all the layers above the water table should be far less than that of layers in the deep. The influence coefficient of the bottom-layer (the layer influenced the most by the seismogenic processes) within the detection range should be far greater than that of any other layers; and at the same time, it is also required that the probing depth of the observation system is not less than that indicated by the existing earthquake cases. Finally, according to this method, we selected the parameters of underground resistivity observation, i. e. the buried depth of the electrode is 200 m, the distance between the power supply poles is 1 050 m, and the intervals of electrodes is 350 m. The optimal observation effect can be obtained by arranging the symmetrical quadrupole.

**Keywords:** geo-resistivity observation; the method for determining electrode buried depths and intervals; influence coefficients; probing depths