

赵斐、叶青、解滔等,2018,平凉台井下地电阻率观测影响系数分析,中国地震,34(1),104~111.

平凉台井下地电阻率观测影响系数分析

赵斐¹⁾ 叶青²⁾ 解滔²⁾ 范晔²⁾ 张远富¹⁾

1) 平凉中心地震台,甘肃省平凉市崆峒区广成路 39 号 744000

2) 中国地震台网中心,北京 100045

摘要 根据地电阻率影响系数理论,以平凉台 4 层电性结构为例,分析了井下对称四极地电阻率观测影响系数随深度和极距的变化。结果表明:对于固定的观测极距,影响系数与电极埋深之间的关系复杂;通过计算各层影响系数的大小,认为平凉台井下观测对地表及浅层干扰有较好的抑制作用,其分析结果可为在类似台址电性结构中实施井下地电阻率观测时选择电极埋深和供电极距提供参考。

关键词: 井下地电阻率 电性结构 影响系数 干扰

[文章编号] 1001-4683(2018)01-0104-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

1966 年河北邢台地震后,国家引入物探地电阻率法进行地震预测实验观测,此后由政府组织建设了大规模、长期连续观测的台网。目前在中国大陆人口密集、大中城市附近的地震活动区带共有 70 多个台站用于常规监测,每台布设 2~3 个测道,采用地表电阻率对称四极观测装置(杜学彬等,2006)。至今已积累大量的观测数据和科学研究成果,在方法理论、观测技术、观测数据应用等方面取得较大进展(钱复业等,1982;钱家栋等,1985、1998;杜学彬,2010;王兰炜等,2011)。

近年来,地表地电阻率观测受到地表环境影响,其可持续性发展受到威胁,井下地电阻率观测由此成为目前发展方向之一。井下地电阻率观测是将原本埋在地表的电极装置深埋在地下,在地下水平向开展对称四极以及在垂直向(同一井下电极埋深不同)进行地电阻率观测。这种观测方式不但能有效抑制地表干扰,而且能有效化解地震观测与当地经济和社会发展之间的矛盾。山东、河北等地多年前就开始了地电井下观测,供电、测量电极均置于井底(王帮本等,1981;孟庆武等,1991;孙承德等,1996、1998),但是,在这些早期建设的 10 多个井下地电阻率观测台站中仅广东河源台至今仍在持续观测,其余台站全部停测。近年来,随着台站所在地经济建设的高速发展,地表大极距、多方位的地电阻率观测遇到的观测

[收稿日期] 2017-10-27; [修定日期] 2018-01-23

[项目类别] 甘肃省地震局科技发展青年基金(026-5)资助

[作者简介] 赵斐,男,1982 年生,工程师,主要从事地震前兆监测及研究工作。E-mail: zhaoshiguer_1982@163.com

叶青,通讯作者,女,1977 年生,高级工程师,主要从事地震电磁研究和地电学科技技术管理工作。

E-mail: qing_gef@126.com

环境恶化的问题日趋严重,因此建设井下观测装置被重新重视起来。2008年以来,在全国地电台网技术管理部门和地电学科专家的推动下,我国开始陆续发展井下地电阻率台站。2010年以来先后建设了江苏海安台、河北大柏舍台、陕西合阳台、甘肃天水台和平凉台等10多个井下地电阻率台站,继续进行实验观测,并开展了井下观测技术、方法理论方面的研究(聂永安等,2010;解滔等,2012,2016;毛先进等,2014;杨兴悦,2012)。除了规避地表人为的观测环境干扰,井下地电观测还能较好地降低因浅层潜水升降和介质含水率季节性增减所引起的视电阻率年变化以及获得地表以下较深部介质的电性变化的信息。

在上述井下地电阻率观测台站中,甘肃平凉台建设了井下多层水平观测装置,供电极大,并具有完整的台址“十子”电测深资料。本文以平凉台4层电性结构为例,依据解滔等(2016)提供的程序,计算了平凉台4层水平层状均匀介质中随观测极距和电极埋深变化时的各层介质的影响系数,通过各层介质影响系数的大小评估了平凉台井下观测对地表及浅层干扰的抑制能力,分析结果也可为在类似台址电性结构中实施井下地电阻率观测时选择电极埋深和供电极距提供参考。

1 平凉台井下地电阻率观测简介

平凉台位于南北地震带北段的六盘山断陷带东麓大断裂的东侧,即陇西旋卷构造系向南收敛的区域,地处平凉市西郊崆峒乡辖区内,距市区约11km,位于崆峒乡政府所在地寨子街的西侧。平凉台地表地电阻率观测项目始测于1975年12月,自1997年迁建后,观测资料连续可靠,但近几年随着当地社会经济的发展,观测环境遭到了破坏,观测资料受干扰明显,以广成山庄施工及运营干扰为主要干扰因素。2012年4月中旬,测区内修建了平定高速公路,其平凉西出口横穿整个测区,观测场地遭受环境干扰影响更加严重,地表观测系统已无法正常运行,因此对地表观测装置进行了改建。经专家多次论证,尝试采用了井下地电阻率观测方案(赵斐等,2015)。其井下电阻率观测装置于2014年1月正式运行,目前使用ZD8MI多极距地电仪。观测装置布设NS、EW两个观测方向,每个装置采用对称四极观测装置,井下水平正交布设(图1)。观测装置包括地表观测装置、井下40m水平观测装置、井下60m水平观测装置、井下80m水平观测装置、井下100m水平观测装置、垂直观测装置6个测道和验证测量系统1个测道等,共计14个测道。其中,NS装置供电极距 $AB=450\text{m}$,测量极距 $MN=150\text{m}$;EW装置供电极距 $AB=240\text{m}$,测量极距 $MN=80\text{m}$ 。本文仅对水平观测装置介质影响系数进行分析。

2 地电阻率影响系数理论

根据地电阻率观测影响系数的计算方法,观测到的地电阻率变化可以表述成测区不同区域介质电阻率变化的加权和(钱家栋等,1985),因此,可依据不同的观测极距和不同电极埋深时各区域介质对视电阻率的影响系数来评估井下观测对地表干扰的抑制能力和对深部岩层电阻率变化的响应能力。如果将地电阻率测区划分为任意的 n 个区域,每一个区域介质电阻率为 $\rho_i(i=1,2,\dots,n)$ 。在测区电性结构与观测装置确定时,地电阻率 ρ_a 是各分区介质电阻率的函数, ρ_i 与 ρ_a 之间的关系为

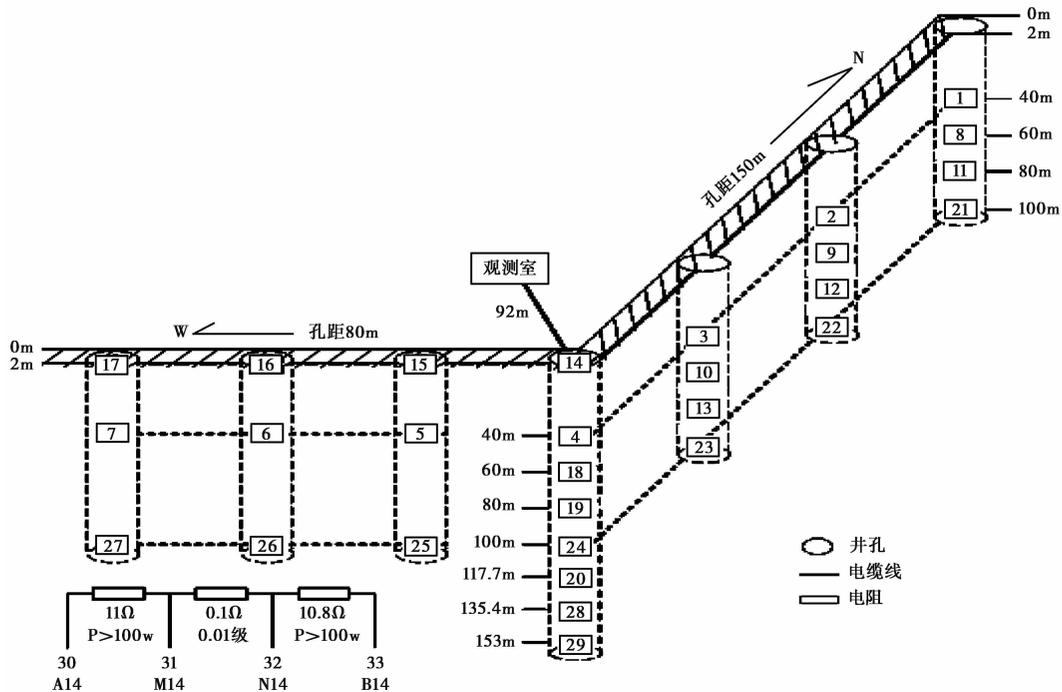


图 1 平凉台井下地电阻率观测布极

$$d(\ln\rho_a) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial \ln\rho_a}{\partial \ln\rho_i} d(\ln\rho_i) \tag{1}$$

多数情况下,各分区介质电阻率在一定时间内的相对变化非常小, $\Delta\rho_i/\rho_i$ 远小于 1, 因此,将式(1)作 Taylor 级数展开,二阶及高阶项远远小于一阶项,可忽略不计。地电阻率相对变化可以简单地表示为各分区介质电阻率相对变化的加权和,即

$$\frac{\Delta\rho_a}{\rho_a} = \sum_{i=1}^n B_i \frac{\Delta\rho_i}{\rho_i} \tag{2}$$

式中, B_i 称之为影响系数,其表达式为

$$B_i = \frac{\partial \ln\rho_a}{\partial \ln\rho_i} = \frac{\rho_i}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i} \tag{3}$$

同时,影响系数 B_i 满足如下关系,即

$$\sum_{i=1}^n B_i = 1 \tag{4}$$

测区介质可以按任意大小划分,用数值计算方法讨论各区域介质对地电阻率观测的三维影响系数。这里主要讨论各层介质整体对观测的影响,因而按照 n 层水平层状结构将测区划分为水平层状的 n 块区域,采用解析表达式和二级装置滤波器算法计算对称四极装置的视电阻率和相应的影响系数。

3 平凉台井下地电阻率观测影响系数分析

3.1 观测资料

平凉台井下水水平观测 NS 测道 2014~2016 年日均值资料如图 2 所示。随着春季降雨量开始增加,地表介质含水率增加,井下地电阻率观测值下降;进入秋冬季后降雨量减小,地表介质电阻率上升,井下地电阻率观测值上升,表现出明显的“夏高冬低”的年变形态。年变幅度统计如表 1 所示,年变幅度依次为:井下 40m>井下 60m>井下 80m>井下 100m。由此可见,电极埋深越深,年变幅度变化越小。但整体而言,4 个测道年变幅度均变化较小。另一方面,图 2 还显示出 4 个不同深度的测道地电阻率变化形态较吻合,且同步。

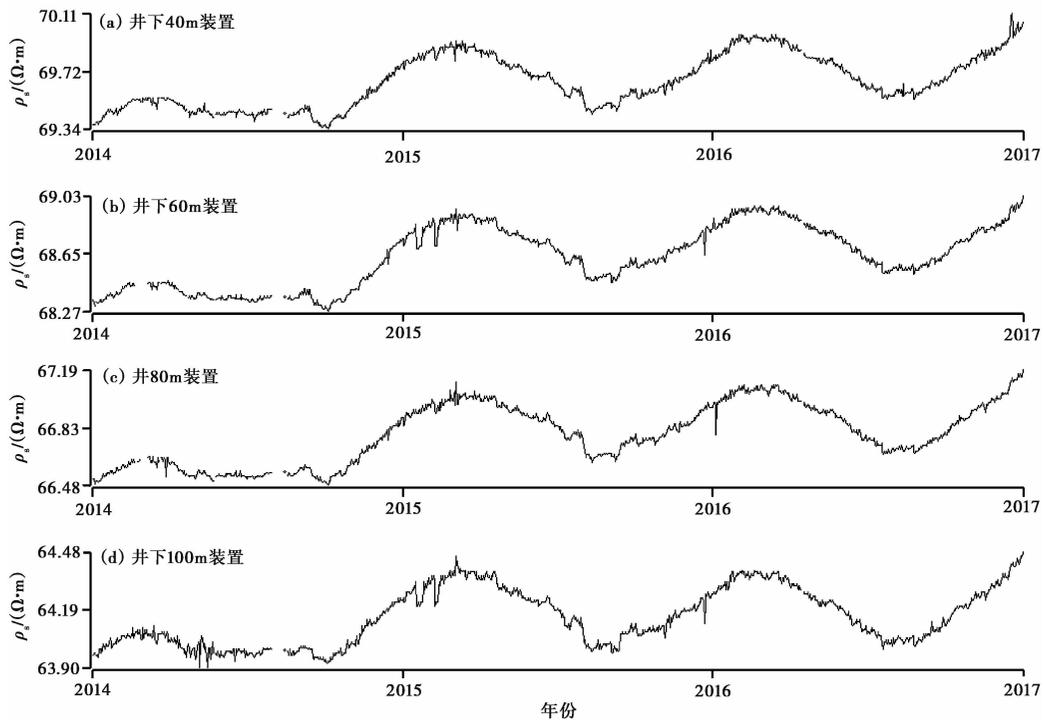


图 2 平凉台井下水水平观测 NS 测道地电阻率观测曲线

3.2 影响系数分析

平凉台电测深曲线如图 3(a) 所示,大致可视为 KH 型,反演的电性结构如表 2 所示。依据该电测深曲线在水平层状均匀模型下反演的电性结构如图 3(a) 所示,第 2 层为厚度 25m 的高阻层,底层介质电阻率值也较高。各层介质影响系数随深度变化曲线如图 3(b) 所示,当 $H=0$ 时,第 2、3 层介

表 1 平凉台井下水水平观测 NS 测道地电阻率年变幅度统计

装置	年变幅度/%			平均值/%
	2014 年	2015 年	2016 年	
井下 40m	0.63	0.70	0.82	0.72
井下 60m	0.70	0.69	0.76	0.71
井下 80m	0.63	0.73	0.76	0.70
井下 100m	0.55	0.76	0.76	0.69
井下 40m	0.63	0.55	0.65	0.61
井下 100m	0.59	0.41	0.44	0.48

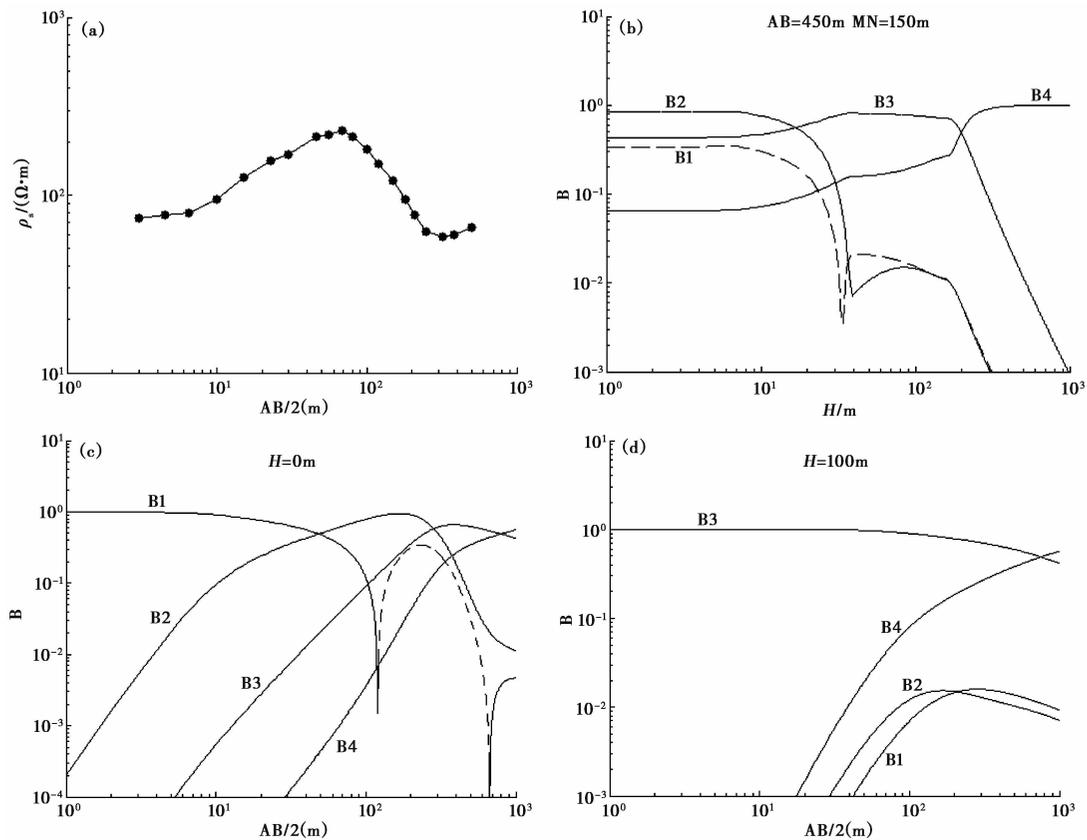


图3 平凉台影响系数分析

(a) 平凉台电测深曲线; (b) 平凉台影响系数随深度的变化; (c) 地表观测时影响系数随观测极距的变化; (d) 井下观测时影响系数随观测极距的变化

质影响系数较大,说明此时视电阻率的变化主要反映中间两层介质电阻率的变化,第1层介质影响系数为负数(图3(b)中虚线部分)。由地表至第1、2层分界面($H=34\text{m}$)过程中,第1层介质影响系数迅速减小, H 在第2层介质增加时,第1层介质影响系数则增加;当电极埋深 $H=100\text{m}$ 时,第1、2层介质影响系数较小,约为0.01,此时,视电阻率观测值主要体现第3层介质电阻率的变化,其次是第4层。当电极埋深继续增加时,第1、2、3层介质影响系数迅速减少,趋近于零,第4层影响系数趋近于1,占据主导地位。

表2 平凉台电测深曲线反演的电性结构

分层	电阻率值/ $(\Omega \cdot \text{m})$	各层顶部埋深/m
1	73.0	7.1
2	426.3	32.1
3	27.9	121.2
4	130.9	∞

图3(c)是地表 $H=0$ 时各层介质影响系数随观测极距的变化,当 $AB/2$ 较小时,第1层介质影响系数最大,说明此时视电阻率的变化主要反映了表层介质电阻率的变化,当极距 $AB/2$ 超过120m后,第1层介质影响系数出现负值(图3(c)中虚线部分)。随着 $AB/2$ 逐渐增大,第2、3层影响系数先增加,后减小,第4层影响系数则是逐渐增加。

图 3(d) 是埋深 $H=100\text{m}$ 时各层介质影响系数随观测极距的变化, 电极位于第 3 层。当 $AB/2$ 较小时, 视电阻率主要反映第 3 层介质电阻率的变化, 随着观测极距的增加, 第 3 层介质影响系数逐渐减小, 第 4 层介质影响系数增加, 第 1 层与第 2 层则是先增加后减小。

平凉台井下地电阻率观测 ($AB=450\text{m}$, $MN=150\text{m}$) 各层影响系数统计表如表 3 所示, B1、B2、B3、B4 分别代表水平层状影响系数的第 1~4 层。整体而言, 平凉台井下观测的年变化幅度均较小, 地表观测时第 1 层介质影响系数绝对值要大于井下观测时的影响系数, 使得地表观测的

表 3 平凉台影响系数统计 ($AB=450\text{m}$, $MN=150\text{m}$)

电极埋深/m	B1	B2	B3	B4
0	-0.3397	0.8414	0.4331	0.0652
40	0.0210	0.0075	0.8124	0.1592
60	0.0199	0.0129	0.8003	0.1669
80	0.0176	0.0149	0.7844	0.1830
100	0.0153	0.0145	0.7652	0.2050

年变幅度要大于井下观测的年变幅度。井下观测第 1、2 层影响系数小于地表观测的影响系数, 说明井下观测对浅层介质电阻率的变化干扰具有抑制作用。平凉台井下观测第 3、4 层介质影响系数均大于地表观测, 说明如果孕震作用引起第 3、4 层介质电阻率的变化, 那么平凉台现有的井下观测映震能力要优于地表观测。总之, 平凉台井下观测受浅层干扰影响较小, 便于资料分析和异常认定, 井下观测效果要好于之前的地表观测。

4 对平凉台井下观测装置设计的讨论

井下观测的目的在于抑制地表干扰和突出由孕震引起的深部岩层介质电阻率变化。本文采用水平层状介质模型讨论了平凉台各层介质的影响系数, 分析结果表明: 在不同电性结构中实施井下观测, 发现各层介质影响系数随电极埋深和极距的不同表现出复杂的变化。观测极距固定时, 影响系数并非都随着电极埋深的增加而呈现出单调的变化: 在某些深度范围内对地表干扰具有放大作用, 但只要观测深度足够深, 就可以抑制地表干扰, 突出深部信息。这与解滔等(2012)所得出的结论一致。电极埋深固定时, 影响系数随观测极距的变化也比较复杂; 小极距观测时, 电极所在层位的电阻率值变化较大, 即电极所在层位的影响系数最大; 随着极距的增加, 地下介质深部信息的反映能力随之增加。

图 4 是采用图 3(a) 所示电性结构计算的平凉台各层介质影响系数随观测极距 AB 和电极埋深 H 的变化。当极距 $AB/2=150\text{m}$, 埋深 H 为 $0\sim 50\text{m}$ 时, 第 1 层介质影响系数变化梯度较大; 当极距 $AB/2>150\text{m}$, 埋深 $H>50\text{m}$ 时, 影响系数变化平稳且数值很小。第 2 层介质在小极距浅层观测时, 影响系数为 0.4 左右, 其他情况影响系数都较小, 在 $0.1\sim 0.2$ 之间。在图 4 所示的观测极距范围内, 当电极埋深为 170m 时, 第 3 层介质影响系数占主导地位, 数值在 $0.6\sim 0.9$ 之间; 当电极埋深 $>170\text{m}$ 后, 第 4 层影响系数逐渐增加并占据主导地位。

目前, 平凉台井下观测系统中, 第 3 层介质电阻率的变化对观测整体的影响最大。一般认为孕震应力主要引起深部介质电阻率发生变化, 观测装置应兼顾反映深部介质的变化。因此, 在观测极距 AB 一定的情况下, 电极埋得越深越好。考虑到目前的井下观测技术, 平凉台观测装置兼顾第 3 层和第 4 层介质电阻率的变化且适当的加大极距较为适宜。从图 4 中可以看出, 观测极距 $AB/2$ 取 $200\sim 250\text{m}$, 电极埋深 H 取 $170\sim 200\text{m}$ 时, 就可满足要求。

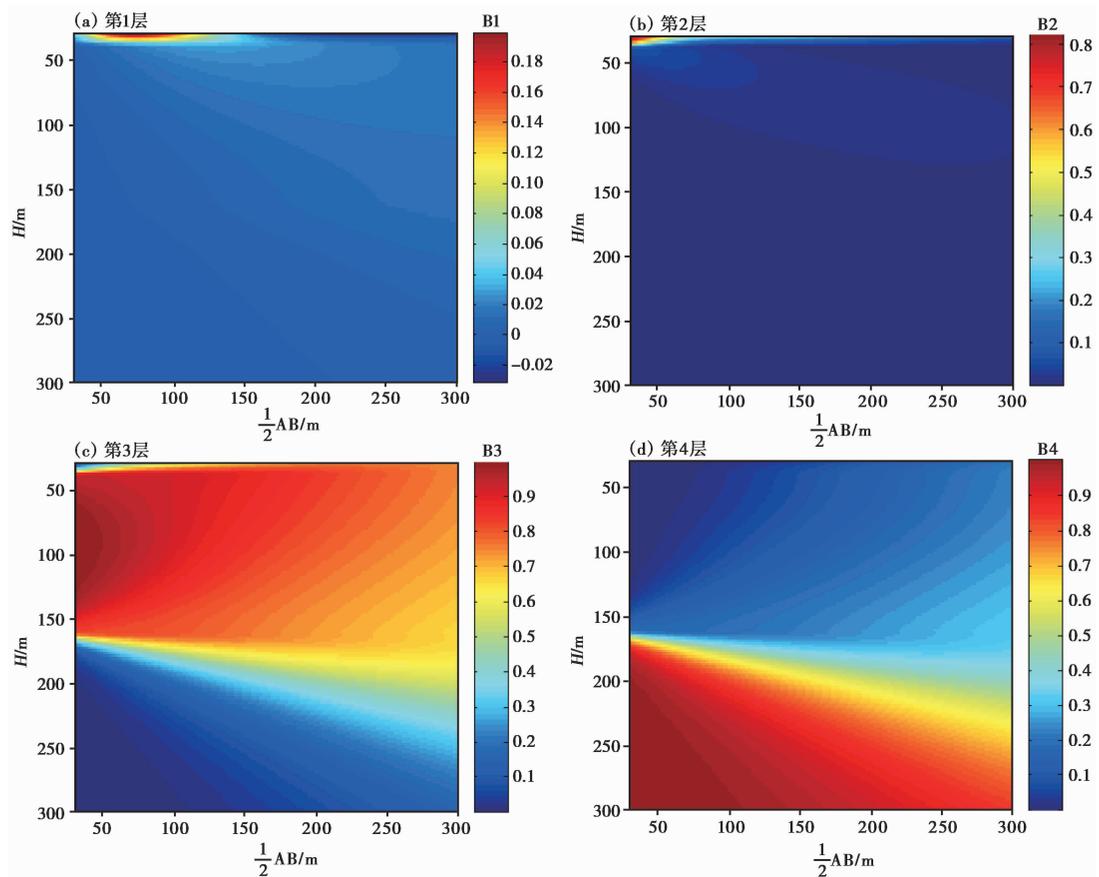


图 4 平凉台各层介质影响系数随观测极距及深度的变化

5 结论

本文通过平凉台电测深曲线反演的电性结构,分析了在 4 层水平层状介质模型下,该台井下观测各层的介质影响系数,并讨论了如何利用影响系数随电极埋深和观测极距的变化而变化来选择合适的观测极距和电极埋深。结果发现,随着观测深度的增加,各层影响系数并非单调变化,在相同的观测极距下,电极埋深在一定深度范围内时对地表介质季节性干扰具有放大作用;但当电极埋深足够深后,能够有效抑制地表浅层干扰,突出深部介质电阻率的变化信息。对于其他将要进行井下地电阻率改造的台站,需要根据自己台站实际的电性结构计算不同电极埋深及供电极距下的介质影响系数,在保证有效抑制地表干扰和获取深部信息的基础上,找到最佳观测极距及电极埋深。

参考文献

杜学彬,2010,在地震预报中的两类视电阻率变化,中国科学:地球科学,40(10),1321~1330.
 杜学彬、赵家骝、谭大诚等,2006,DB/T 18.1-2006 地震台站建设规范-地电观测台站-第 1 部分:地电阻率台站,北京:地震出版社.

- 解滔、杜学彬、陈军营等,2012,井下地电阻率观测中地表电流干扰影响计算,地球物理学进展,27(1),112~121.
- 解滔、杜学彬、卢军,2016,井下视电阻率观测影响系数分析,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,地震学报,36(4),678~685.
- 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,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,地震学报,32(1),33~40.
- 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,12(9),831~839.
- 钱家栋、曹爱民,1998,1976年唐山7.8级地震地电阻率和地下水前兆综合物理机制研究,地震,18(增刊I),1~9.
- 钱家栋、陈有发、金安忠,1985,地电阻率法在地震预报中的应用,北京:地震出版社.
- 孙承德、顾贞庆、钟国芬等,1998,莒县深井电阻率异常与地震,地震研究,21(3),277~281.
- 王帮本、刘永兰、李验轩,1981,深井电阻率与地震预报,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实验研究,地震,31(1),20~31.
- 杨兴悦、杨立明、康云生等,2012,天水地震台井下地电观测系统介绍及其分析,地震研究,35(1),92~97.
- 赵斐、张远富、武善艺等,2015,平凉崆峒地电台深井地电阻率观测系统介绍及分析,高原地震,27(2),41~47.
- Du X B,2011,Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction,Sci China Earth Sci,54(1),145~156.

Sensitivity Coefficient Analysis of the Deep-well Apparent Resistivity Measurement of the Pingliang Seismic Station

Zhao Fei¹⁾ Ye Qing²⁾ Xie Tao²⁾ Fan Ye²⁾ Zhang Yuanfu¹⁾

1) Pingliang Center Seismic Station, Pingliang 744000, Gansu, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Based on geo-electric resistivity sensitivity coefficient, we take the four layer electrical structure of the Pingliang station as an example to analyze the distributions of sensitivity coefficients with the spacing and depth of the electrodes when the Schlumberger arrays are used in the resistivity measurement. The results show that for a fixed Schlumberger array, sensitivity coefficients display complex variations with the increase of electrode depth. By calculating the size of the sensitivity coefficient of each layer, we find that the well observations of the Pingliang station has good inhibition to surface and shallow interference of deep well geo-electric resistivity. The result of the analysis can be references for the selection of electrode depths and power supply distance in the implementation of deep well geo-electric resistivity observation for similar stations.

Key words: Deep well geo-electric resistivity; Electrical structure; Sensitivity coefficient; Disturbance