

肖武军、解滔、张尧,2019,晋冀蒙交界及附近地区小极距井下地电阻率观测装置设计,中国地震,35(1),134~143.

晋冀蒙交界及附近地区 小极距井下地电阻率观测装置设计

肖武军 解滔 张尧

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 为提升 2022 年北京冬奥会期间地电阻率测项的震情保障能力,将对晋冀蒙交界及附近区域的宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷 8 个台站在原有观测基础上增加具有全空间性质的小极距井下地电阻率观测。本文根据台站钻孔岩芯剖面 and 电测深数据反演测区水平层状电性结构,利用介质对地电阻率观测的影响系数方法,计算影响系数随极距和埋深的变化,选择合适的极距和埋深,使浅层介质对地电阻率观测的影响尽可能小,使目标层位对观测的贡献尽可能大,减少浅层介质对观测的影响。由此得出了各台站观测极距及埋深等装置系数,在此基础上完成了 8 个台站观测装置的方案设计。

关键词: 地电阻率 小极距 井下观测 观测装置 晋冀蒙

[文章编号] 1001-4683(2019)01-0134-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

我国自 1966 年邢台 $M_s 7.2$ 地震后开始了规模化和规范化的定点台站地电阻率(也称视电阻率)连续观测,在 50 多年的观测实践过程中,记录到了发生在台网内或附近多次大地震前突出的中短期异常(钱复业等,1982;钱家栋等,1985、2013;赵玉林等,2001;汪志亮等,2002;Du,2011;解滔等,2018)。与地震有关的异常通常表现为年尺度的持续性下降或上升变化,大地震近震中区以下降型异常为主(Du,2011),不同方向异常呈现出与地震主压应力轴方位有关的各向异性变化(赵玉林等,1995;钱复业等,1996;杜学彬等,2007),震中区及邻近的台站能够完整地呈现震前“中期下降—短期加速下降—准同震阶跃—震后恢复”的异常变化过程。异常映震空间范围可达 300km,但 150km 范围内更为集中(杜学彬等,2000),在台网相对较密的区域能观测到由震中向外围异常起始时间的延迟和异常幅度的衰减现象(钱复业等,1982;赵玉林等,2001)。

地电阻率能在震情保障工作中发挥作用,离不开高质量的观测数据和足够空间密度的台网布局。近年来随着城镇化建设的推进,地电测区环境干扰影响日趋严重,造成观测数据质量下降,部分台站面临停测或搬迁。目前,台网稀疏且分布不均匀和观测数据质量下降已经成为地电阻率方法在地震监测预测中面临的瓶颈。长期以来,固定台站的地电阻率观测

[收稿日期] 2018-12-25; [修定日期] 2019-02-11

[项目类别] 冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目、中国地震局地震科技星火计划项目(XH19054Y)共同资助

[作者简介] 肖武军,男,1976 年生,高级工程师,主要研究方向为地球物理观测。E-mail: xiaowj@seis.ac.cn

是采用地表大极距、多方位的观测装置,供电极距 AB 多为 1000m 左右,布极区占地面积大。目前,随着城市化进程和生命线工程建设,勘选符合场地条件的观测场地比较困难,尤其是在地震多发且以山地为主要地形地貌特征的地区,同时布极区范围大,引入环境干扰的几率高,观测环境保护难度较大。如果在能够有效记录到地震异常的前提下减小布极区范围,则上述瓶颈问题可得到解决。为抑制来自地表的干扰,我国地电工作者自 20 世纪 80 年代开始陆续开展了井下地电阻率实验研究(王帮本等,1981;苏鸾声等,1982;刘允秀等,1985;刘昌谋等,1994);2008 年来,为应对地表大极距观测受到的观测环境影响,全国地电台网技术管理部门和地电学科专家推进了井下地电阻率观测实验,目前已在全国建成了 14 个井下台站,同时部分台站正在改造为井下观测装置。实验结果表明,井下观测能有效弱化或抑制地表杂散电流和电性异常体类(如金属管线、沟渠开挖、基本建设等)干扰对观测的影响,在几次中强地震前也记录到了异常变化(康云生等,2013;高曙德,2016)。

2022 年冬季奥运会将在北京及河北张家口举办,及时准确把握举办区域及周边地区的震情是冬奥会震情保障工作的重点。晋冀蒙交界区域是近几十年来地震活动较为频繁的区域,有记录以来该区域共发生 8 次 6 级以上地震,其中 7 级地震 1 次,最近一次强震为 1998 年张北 6.2 级地震。该区域及附近地电阻率观测台网在 1976 年唐山 M_s 7.8、1989 年大同-阳高 M_s 6.1 震群和 1998 年张北 M_s 6.2 等地震前都记录到了清晰的中短期异常(汪志亮等,1990;高立新等,1999;王志贤等,1999),表明在这些台站所在的观测场地观测地电阻率能对该区及周边的强震实施有效的监测预测。该区域地表地电阻率观测台站目前也受到了不同程度的干扰,另外,目前较大极距(最大约 450m)、井深多为 100m 左右的井下地电阻率观测并不能完全抑制上述 2 类地表干扰。为此,“冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目”将对晋冀蒙交界及附近的宝昌、集宁(新增台站)、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷 8 个台站进行升级改造,在原测区内增加井下小极距地电阻率观测,以期提升地电阻率观测对该区域的震情监测能力,并实验小极距井下地电阻率观测对地震的监测预测能力。本文介绍了根据上述台站的台址电测深资料和钻孔剖面设计的井下小极距地电阻率观测装置及其依据。

1 设计方法

地表浅层电性异常体干扰源可以等效为浅层介质点电阻率发生变化,其对观测的影响可以在影响系数理论框架下进行分析(钱家栋等,1985)。对于一些地层电性结构,在相同的观测极距下,水平测道的电极埋设在一定深度范围内时对地表干扰具有放大作用,因此需要结合台站实际的电性结构计算各层介质对观测的影响系数分布,选择合适的装置极距和埋深以保证对地表干扰进行有效的抑制(毛先进等,2014;解滔等,2016)。

如果将地电阻率测区划分为任意的 N 块区域,每一块区域介质电阻率为 ρ_i ($i=1,2,\dots,N$),在测区电性结构确定、观测装置和极距以及布极位置确定时,地电阻率 ρ_a 是各分区介质电阻率的函数(钱家栋等,1985、1998;Park et al,1991;Lu et al,2004)。

在多数情况下,各分区介质电阻率在一定时间内的相对变化非常小, $\Delta\rho_i/\rho_i \ll 1$ 。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

$$\frac{\Delta\rho_a}{\rho_a} = \sum_{i=1}^N B_i \frac{\Delta\rho_i}{\rho_i} \quad (1)$$

式中, B_i 为第 i 层介质对观测的影响系数, 其表达式为

$$B_i = \frac{\rho_i}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial \rho_i} \quad (2)$$

影响系数 B_i 满足如下关系 (Seigel, 1959; Roy et al, 1981; Wait, 1981)

$$\sum_{i=1}^N B_i = 1 \quad (3)$$

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, 采用井下观测电位分布的解析表达式 (聂永安等, 2009、2010) 和二级装置滤波器算法计算对称四极装置下各层介质的影响系数 (O'Neill et al, 1984; 姚文斌, 1989) 随极距和埋深的分布, 然后选择合适的极距和埋深, 使表层介质的影响系数尽可能小, 目标层位介质的影响系数尽可能大。

2 观测装置设计

2.1 观测装置设计思路

地电阻率是探测范围内介质电阻率的综合反映, 观测极距越大, 水平方向和深度方向的探测范围也越大。在装置埋深一定时, 随着极距的增加, 对深部信息的反映能力增加, 但各层影响系数与地表观测时也将逐渐趋于相近, 井下观测的作用越来越小。理想情况下, 在观测极距一定时, 只要电极埋设足够深, 总是可以抑制地表干扰、突出深部信息。但受制于施工技术条件、投资规模和难以获得较大占地面积的观测场地, 此次“冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目”将采用供电电极距为 100m 左右的小极距观测方式, 且在水平测道各电极的埋深大于极距的条件下, 开展具有地下全空间电流分布的小极距井下地电阻率实验观测。

地电阻率异常的各向异性变化与地震主压应力方向有关, 在分析各向异性时, 通常将测区介质简化为均匀各向异性介质, 且 2 个电性主轴沿水平方向, 另一个主轴沿垂直方向 (钱复业等, 1996; 杜学彬等, 2007), 共计 4 个独立分量 (即 3 个主轴电阻率和水平主轴方位)。因此, 每个台站布设 3 个方向的水平测道和 1 个垂直方向测道。由于采用小极距的观测方式, 探测范围内介质可近似视为均匀各向异性介质, 依据 4 个测道观测值, 可以计算出 3 个方向电性主轴电阻率和水平主轴的方位角, 从而可以进一步分析地震前主轴真实电阻率和主轴方位的变化。由于观测极距大幅减小, 地电阻率深度方向探测范围也减小, 为使水平观测的 3 个测道反映相同深度范围的介质电阻率变化, 应使 3 个测道具有相同的极距。为进一步节约经费, 3 个水平测道采用等边三角形布极, 每个供电电极为 2 个测道共用, 以这样的布极方式, 每个台站可减少 3 口井的建设费用。虽然等边三角形布极方式与目前台站两个垂直测道和一斜测道的方式存在差异, 但这并不影响依据地电阻率观测值进行各向异性分析。垂直测道在垂直方向对称于水平测道, 并增加地表水位和气象三要素观测 (图 1)。此次将对晋冀蒙交界及附近区域的宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷 8 个台站增加小极距井下地电阻率观测 (延庆台已经完成小极距井下观测建设), 台站分布如图 2 所示。下面以宝昌台为例, 给出台站观测方案的设计过程。

2.2 宝昌台观测装置设计

宝昌台 (又称太仆寺旗台) 位于内蒙古自治区锡林郭勒盟宝昌镇, 台站所在区域为内蒙

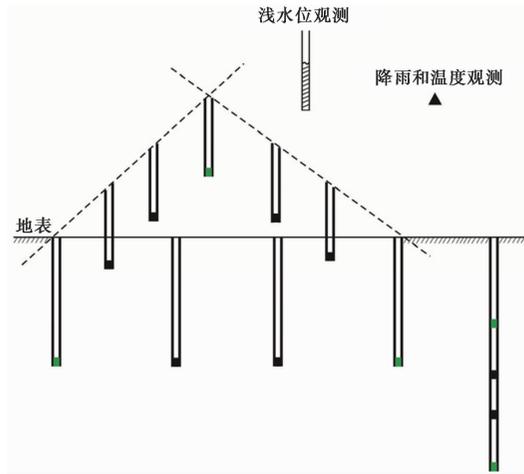


图 1 小极距井下地电阻率观测布极示意图

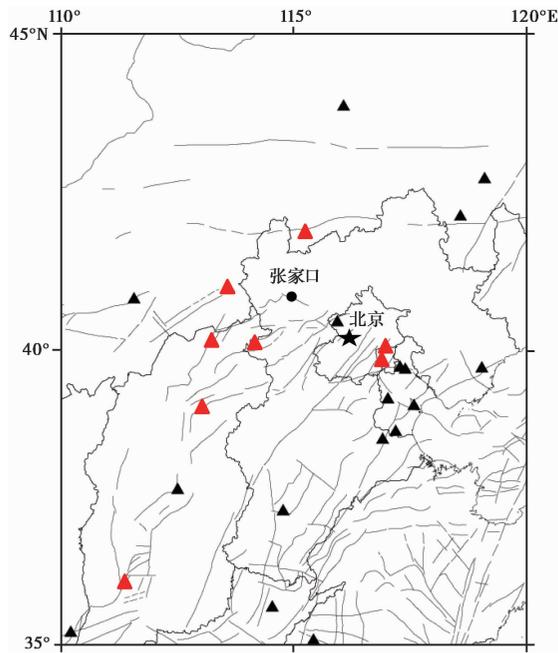


图 2 计划增加小极距井下观测的 8 个台站空间分布
黑色三角为原有台站；红色三角为计划增加台站

地轴东段,四级构造单元,属阴山台拱的化德穹褶断束,地貌以低山丘陵地带为主,康保至赤峰深断裂带、张北-沽源大断裂带通过宝昌境内,有多处中生代断陷盆地,主要构造线为北东走向。台站钻孔岩芯柱状剖面显示,测区地下介质主要由明显的 3 层物质组成,表层介质厚度为 8.5m,下伏基岩为石英斑岩,深度约为 71.5m(图 3(a))。据电测深资料,测区为 H 型电性剖面(图 3(a)),电性 3 层结构与钻孔资料分层结构一致。结合电测深数据和钻孔资料,将测区地下介质简化为 3 层模型,电性结构如图 3(a)所示。

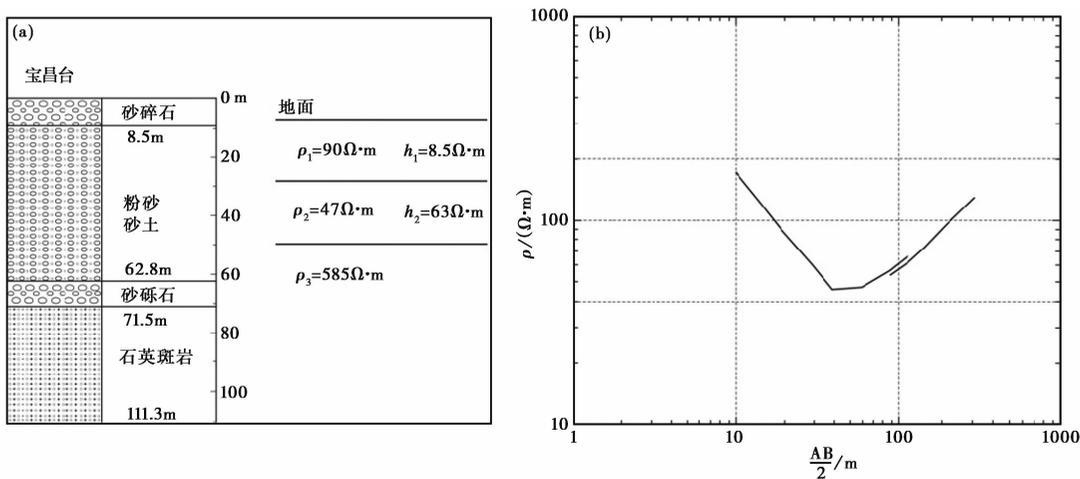


图3 宝昌台钻孔岩芯剖面(a)和电测深曲线(b)

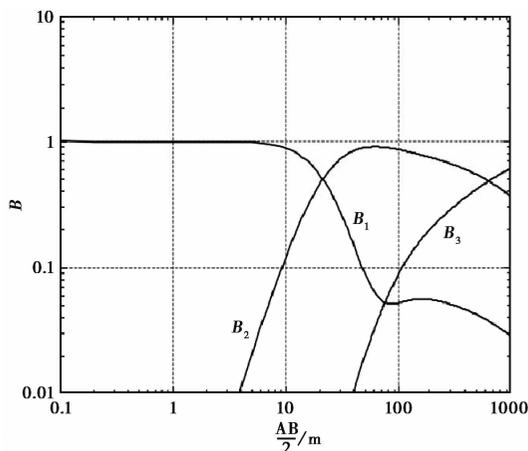


图4 宝昌台地表观测影响系数分布

宝昌台现有地表观测布设 NS 和 EW 两测道,供电极距 AB 均为 580m,测量极距 MN 均为 80m。地表观测时各层介质影响系数如图 4 所示,在 $AB = 580m$ 时,第 1、2 和 3 层介质影响系数值分别为 0.0508、0.7359 和 0.2133,说明在各层介质电阻率发生相同幅度的相对变化时,第 2 层介质对观测值相对变化的贡献程度最大,其次是第 3 层。因此,第 2 层和第 3 层介质是目前地表观测的主要贡献层位。宝昌台在 1989 年大同-阳高 $M_s 6.1$ 地震、1998 年张北 $M_s 6.2$ 地震、1999 年大同 $M_s 5.6$ 地震和张北 $M_s 5.7$ 地震前均出现异常(汪志亮等,1990;高立新等,1999;王志贤等,1999),但仅从影响系数分布上还不足以推测出异常的主要贡献层位。通常认为,相对较深的地层更为密实,更易传递应力并产生电阻率变化,因而此次的井下观测将以第 3 层的基岩作为主要目标探测层位。

宝昌台井下观测时各层介质影响系数随深度和极距的变化如图 5 所示,在埋深 $H = 80m$ 左右,极距 $AB = 60m$ 附近时第 3 层介质影响系数已占主导地位,第 1 层影响系数降低至较低水平。通过对比分析观测极距 $AB = 60m$ 时各层介质随深度变化的影响系数(图 6)和原地表

观测的影响系数(图 4),原地表观测主要反映第 2 层介质电阻率变化,其次是第 3 层基岩变化情况。在埋深 $H > 80\text{m}$ 之后,井下观测主要反映第 3 层基岩变化情况,更能反映出区域构造应力对测区介质的影响。因此,宝昌台井下地电阻率观测 3 个水平测道极距 AB 取 60m ,测量极距 MN 取 20m ,电极埋深取 80m ;由于垂直测道可能存在因观测井回填导致整个井呈现低阻特征的风险,垂直观测井距离最近水平观测井距离 $> AB/2$,设计时取该距离为 50m 。垂直观测极距和测量极距同样分别取 60m 和 20m ,在垂直方向相对于水平测道呈对称分布,井深为 110m ,最上端电极埋深为 50m 。所有地电阻率观测井在电极下井时采用尼龙绳或电缆自带的纤维绳固定电极,避免导线电缆承受电极重量,且观测井不采用任何套管。出于相同的原因,地表潜水位观测井距最近地电阻率观测井距离 $> AB/2$ 。

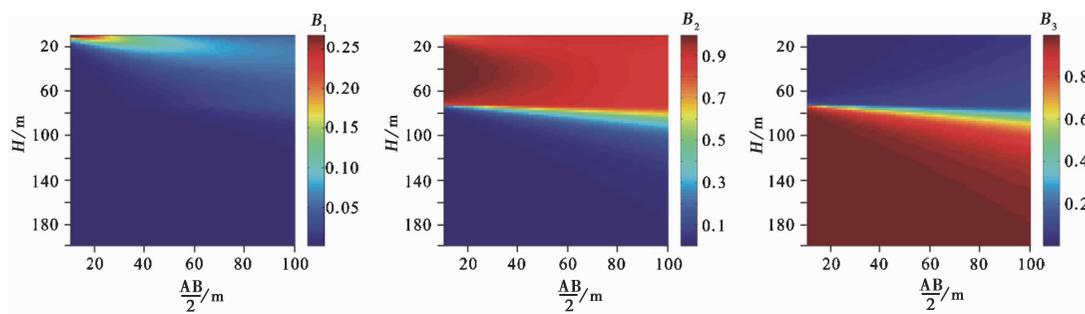


图 5 宝昌台井下观测影响系数随埋深和极距的分布

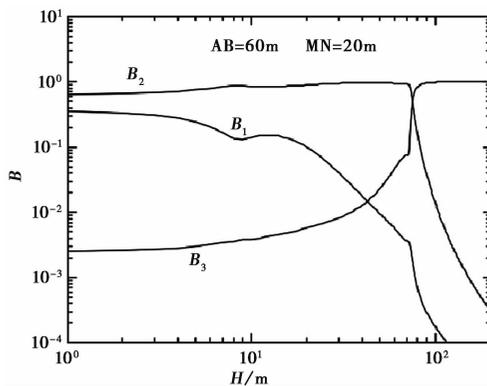


图 6 宝昌台井下观测影响系数随深度变化

在供电极距 $AB = 60\text{m}$,测量极距 $MN = 20\text{m}$ 时,水平测道地电阻率理论计算值随装置深度变化如图 7 所示,在埋深为 80m 时,地电阻率理论计算值约为 $284\Omega \cdot \text{m}$ 。

2.3 总体观测装置设计

采用相同的设计思路和方法,结合台站电测深数据和钻孔岩芯剖面反演台站层状电性结构,计算各层介质影响系数随深度和极距的变化,选择合适的极距和装置埋深,最终宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷 8 个台站井下地电阻率观测的设计方案如表 1 所示。

3 讨论

与地震孕育过程有关的地电阻率异常变化主要反映构造应力作用地下介质孔隙大小和

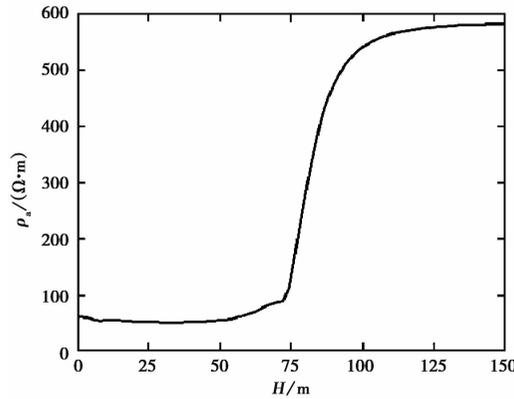


图7 宝昌台井下观测理论地电阻率随深度变化

表1 晋冀蒙交界及附近地区井下地电阻率观测设计方案

| 台站 | AB /m | MN /m | 水平测道埋深 /m | 水平测道 数量 | 垂直测道深度 /m | 垂直测道 数量 | D_1 /m | D_2 /m | 气象 三要素 |
|-----|----------|----------|--------------|------------|--------------|------------|-------------|-------------|-----------|
| 宝昌台 | 60 | 20 | 80 | 3 | 110 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 集宁台 | 80 | 20 | 90 | 3 | 130 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 阳原台 | 80 | 20 | 100 | 3 | 140 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 大同台 | 80 | 20 | 100 | 3 | 140 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 代县台 | 80 | 20 | 110 | 3 | 150 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 临汾台 | 80 | 20 | 110 | 3 | 150 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 通州台 | 80 | 20 | 100 | 3 | 140 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |
| 平谷台 | 90 | 30 | 110 | 3 | 155 | 1 | ≥ 50 | ≥ 50 | √ |

注： D_1 表示垂直测道离最近水平观测井的距离； D_2 表示水位观测井离最近地电阻率观测井的距离；垂直测道深度以最下面电极埋深表示。

孔隙之间连通性改变引起的介质电阻率变化,这已经得到实验研究和许多震例的支持(Mjachkin et al,1975)。实验室内含水岩石标本实验结果显示,主压应力加载过程中地电阻率呈现下降变化,多数岩石临近破裂时加速下降,破裂后恢复上升(张金铸等,1983),与主压应力垂直的方向变化幅度最大,平行方向最小,斜交方向介于二者之间,表现出与应力方向有关的各向异性变化(陈大元等,1983),野外原地实验结果给出的地电阻率变化以及各向异性变化与实验室结果一致(赵玉林等,1983)。1976年唐山 $M_s7.8$ 地震之前,震中150km范围内的14个地电阻率台站中,有9个台站出现了年尺度的趋势下降异常,1个台站出现上升异常,且由震中向外围方向异常起始时间出现延迟,异常幅度出现衰减,揭示出孕震晚期亚失稳阶段应变加速积累并由震中向外扩散的现象,且震中附近的昌黎和马家沟两个台站在临震阶段记录到了加速下降变化(赵玉林等,1978)。唐山地震震源机制解为走滑型,出现下降异常的台站位于压缩区,出现上升异常的台站位于拉张区,而未出现明显异常的台站位于震源机制解的界线附近(钱复业等,1982)。由此可见,需要具有足够密度分布的观测台网和高质量的观测数据,才能更好地分析地电阻率异常及其预测意义。一方面,多个台站出现异

常时可以相互印证;另一方面,只有通过分析不同台站异常的出现时间、幅度、形态和空间范围,并结合各向异性分析,才能更好地对未来地震发生的地点、震级和时间做出判断。

目前,除正在开展井下实验观测的少数台站外,我国地电阻率台站均采用地表大极距的观测方式。随着地方经济建设的快速推进,多数台站已经受到较大程度的干扰,造成观测数据质量下降。大极距观测方式需要较大范围的观测场地,新增台站场地遴选和获取困难,尤其是在大震多发且以山地为主要地貌特征的南北地震带,这也导致了地电阻率台网稀疏和台站分布不均匀的现状。由于布极区较大,测区内工农业设施建设不可避免,环境保护难度较大,观测也难以避免受到干扰。地震预测的目的是服务于保障人民生命财产安全和国民经济建设,不能因为对观测数据质量的要求而阻碍测区附近的经济建设。因此,地表大极距的观测方式已经难以为继。目前地电阻率已有的可靠震例是在地表大极距观测方式下记录到的,其深度方向探测范围与极距相当(赵和云等,1982;杜学彬等,2008)。井下地电阻率观测对地表干扰的抑制能力已经得到台站实验观测和理论分析的证实(解滔等,2012;康云生等,2013;张磊等,2015;王兰炜等,2015),但对于极距较小的井下观测,能否有效记录到与地震孕育有关的异常,目前还无法得到明确结论。钱家栋等(2018)通过对汶川地震前成都台 NE 测道异常的数值模拟分析认为,要合理解释地表观测约 7% 的下降异常变化,需要具有幅度为 20% 的电阻率变化区域的上界面上升至距地表 122m 左右。此次晋冀蒙交界及附近地区 8 个台站井下观测设计方案的极距在 80m 左右,埋深在 100m 左右,其深度方向探测范围可至 180m 左右。此外,延庆台已完成井下观测的建设,水平测道埋深 150m,供电极距为 120m。总体而言,此次“冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目”中采用小极距井下观测具有实验研究性质,验证开展小极距井下地电阻率观测的可行性,希望为地电阻率目前面临的困境提供一种可能的解决办法。同时,测区原有的地表大极距观测也将保留,以开展对比分析。

4 结论

“冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目”将对晋冀蒙交界及附近区域的宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷 8 个台站在原有观测基础上增加小极距井下地电阻率观测,以提升地电阻率测项对该区域的震情监测能力。结合台站钻孔岩芯资料和电测深数据,采用井下地电阻率影响系数方法,给出了每个台站的观测极距和装置埋深,并完成了观测装置设计。根据井下地电阻率影响系数理论分析,设计的电极埋深、极距等观测装置参数,可以减少浅层介质对地电阻率观测的影响,目标层对地电阻率观测影响越大,更能反映出区域构造应力对测区介质的影响。目前,该项目和相应的观测技术方案已通过相关部门审批,将于 2019 年正式启动实施。

致谢:感谢“冬奥会保障”项目提议者刘桂萍研究员对项目申报及本文的大力支持,项目专家组在方案设计与论证中也提出诸多宝贵意见,项目实施组提供了各台站的相关基础资料,在此一并表示感谢。

参考文献

- 陈大元、陈峰、王丽华等,1983,单轴压力下岩石电阻率的研究——电阻率的各向异性,地球物理学报,26(增刊),783~792.
杜学彬、李宁、叶青等,2007,强地震附近视电阻率各向异性变化的原因,地球物理学报,50(6),1802~1810.

- 杜学彬、薛顺章、郝臻等,2000,地电阻率中短期异常与地震的关系,地震学报,22(4),368~376.
- 杜学彬、叶青、马占虎等,2008,强地震附近电阻率对称四极观测的探测深度,地球物理学报,51(6),1943~1949.
- 高立新、黄根喜、阎海滨,1999,张北-尚义 6.2 级地震(1998-01-10)前倾斜与地电阻率前兆异常,地壳变形与地震,19(4),88~90.
- 高曙德,2016,深井地电观测技术在地震监测中的应用探讨,地球物理学进展,31(5),2078~2088.
- 康云生、安海静、马可兴等,2013,天水地电阻率地表与井下多种观测方式的实验分析,地震工程学报,35(1),190~195.
- 刘昌谋、桂燮泰、柴剑勇等,1994,河源地电台全空间地电阻率实验,华南地震,14(3),40~45.
- 刘允秀、吴国有、王蕃树等,1985,深埋电极地电阻率观测的实验结果,见:钱复业、赵玉林、陈英方,地震预测——地电方法论文集,206~216,福州:福建科学技术出版社.
- 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.
- 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.
- 聂永安、姚兰予,2009,成层半空间深埋电极产生的电位分布,中国地震,25(3),246~255.
- 钱复业、赵玉林、黄妮妮,1996,地电阻率各向异性参量算法及地震前兆实例,地震学报,18(4),480~488.
- 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),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.
- 钱家栋、马钦忠、李劲祯,2013,汶川 M_s 8.0 地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究,地震学报,35(1),4~17.
- 钱家栋、张学民、王亚璐等,2018,2018年汶川 M_s 8.0 地震前成都台 NE 向地电阻率趋势异常的数值模拟,地震,38(2),107~116.
- 苏鸾声、王邦本、夏良苗等,1982,井下电极观测地电阻率排除地面干扰的实验,地震学报,4(3),274~276.
- 汪志亮、余素荣,1990,大同-阳高震群地电阻率异常特征及短临预报,地震,(4),11~19.
- 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.
- 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、张宇、张世中等,2015,我国井下地电阻率观测技术现状分析,地震地磁观测与研究,36(2),95~102.
- 王志贤、白云刚、李永庆等,1999,大同-阳高 6.1 级地震的地电前兆研究,山西地震,(3/4),21~24.
- 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.
- 解滔、刘杰、卢军等,2018,2008年汶川 M_s 8.0 地震前定点观测电磁异常回溯性分析,地球物理学报,61(5),1922~1937.
- 姚文斌,1989,电测深数值计算和解释入门,60~64,85~87,北京:地震出版社.
- 张金铸、陆阳泉,1983,不同三轴应力条件下岩石电阻率变化的实验研究,地震学报,5(4),440~445.
- 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,华北地震科学,33(4),49~53.
- 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,西北地震学报,4(1),40~56.
- 赵玉林、李正南、钱复业等,1995,地电前兆中期向短临过渡的综合判据,地震,(4),308~314.
- 赵玉林、卢军、张洪魁等,2001,电测量在中国地震预报中的应用,地震地质,23(2),277~285.
- 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,21(3),181~190.
- 赵玉林、钱复业、杨体成等,1983,原地电阻率变化的实验,地震学报,5(2),217~225.
- Du X B,2011,Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction,Sci China Earth Sci,54(1),145~156.
- Lu J,Xue S Z,Qian F Y, et al,2004,Unexpected changes in resistivity monitoring for earthquakes of the Longmen Shan in Sichuan, China, with a fixed Schlumberger sounding array,Phys Earth Planet Inter,145(1/2/3/4),87~97.
- Mjachkin V I,Brace W F,Sobolev G A, et al,1975,Two models for earthquake forerunners,Pure Appl Geophys,113(1),169~181.
- O'Neill D J,Merrick N P,1984,A digital linear filter for resistivity sounding with a generalized electrode array,Geophys Prospect,32(1),105~123.
- Park S K, Van G P,1991,Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structure beneath arrays of electrodes,Geophysics,56(7),951~960.

- Roy A, Poddar M, 1981, A simple derivation of Seigel's time domain induced polarization formula, *Geophys Prospect*, **29**(3), 432~437.
- Seigel H O, 1959, Mathematical formulation and type curves for induced polarization, *Geophysics*, **24**(3), 547~565.
- Wait J R, 1981, Towards a general theory of induced electrical polarization in geophysical exploration, *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, GE-19(4), 231~234.

Observation Scheme for Short Electrode Spacing Well Apparent Resistivity at the Vicinity of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia Area

Xiao Wujun Xie Tao Zhang Yao

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract In order to enhance earthquake prediction capacity of apparent resistivity during the Winter Olympics in 2022, short electrode spacing well apparent resistivity measurement will be added at 8 seismic stations (i. e., Baochang, Jining, Yangyuan, Datong, Daixian, Linfen, Tongzhou and Pinggu seismic stations), at the vicinity of Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area. This paper combines the borehole core profile and electric sounding data to inverse the layered electric structures of these stations. Sensitivity coefficients of each layer versus electrode spacing and burning depth have been obtained. Then the appropriate electrode spacing and burning depths have been selected, making the effect from surface layer as small as possible and the contribution of the target horizon to observation as large as possible. Observation schemes of the 8 seismic stations have been eventually completed and have been approved by relevant departments. Construction of the stations will be launched in 2019.

Key words: Apparent resistivity; Short electrode spacing; Well measurement; Observation scheme; Shanxi-Hebei-Inner Mongolia area