

樊晓春,李伟,鲍海英,等,2020. 江宁台井下地电阻率变化初步分析. 中国地震,36(3):594~606.

江宁台井下地电阻率变化初步分析

樊晓春¹⁾ 李伟²⁾ 鲍海英³⁾ 董淼⁴⁾ 吴帆¹⁾ 袁慎杰⁵⁾

1)南京市地震监测预警中心,南京 210008

2)南京基准地震台,南京 210014

3)江苏省地震局,南京 210014

4)新沂地震台,江苏新沂 221400

5)南京市江宁区地震办公室,南京 210014

摘要 江宁台附近地铁可能对地电阻率观测的干扰较大,通过提取江宁台井下地电阻率夜间数据来分析其变化并探讨机理。结果表明:①江宁台井下地电阻率具备一定地表浅层抑制干扰能力,主要干扰源为地铁;②夜间1~3时数据突跳与地铁不定期维护有关;③井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$)和 NS($AB=200\text{m}$)2018年10月开始出现快速下降变化后,江宁台周围地震强度明显增强,认为该变化与S340公路金属护栏无关;④井下地电阻率长趋势下降变化与周围深井水位变化一致,反映了周围区域应力调整的变化;⑤井下地电阻率观测 EW($AB=200\text{m}$)在安徽无为 $M_L 4.1$ 地震前出现的“U”型变化与新建S340公路无关;⑥江宁台井下地电阻率共观测到5次“U”型变化,认为与地震有关的可能性较大。

关键词: 地电阻率 井下观测 地铁 地震

[文章编号] 1001-4683(2020)03-0594-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

为缓解地表大极距地电阻率观测环境与城镇化建设、经济建设等之间的突出矛盾,规避环境干扰对地电阻率观测的影响,自2007年起,河北大柏舍台、甘肃天水台、平凉台、武都台、江苏南京台、海安台、江宁台等台站陆续开展了井下地电阻率观测实验。江宁台井下地电阻率观测装置为国内首个达到200m井深的地电阻率观测装置,采取缩短极距和电极深埋200m的措施以减轻轨道交通和地表农作业对观测的影响(沈红会等,2014;樊晓春等,2018)。数据表明,井下观测对布极区地表杂散电流类具有一定抗干扰能力,减小了年变化幅度,受地铁干扰明显小于地表地电阻率观测(樊晓春等,2019a)。但距观测场地更近的南京地铁S7号线、S9号线相继开通,对江宁台井下地电阻率观测造成了较大影响,地铁运行中产生的漏电电流使得地电阻率观测信噪比降低,导致无法分析较小的变化(樊晓春等,

[收稿日期] 2019-10-15; [修定日期] 2020-05-29

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划(XH19015YSX)、国家自然科学基金(A413740808)共同资助

[作者简介] 樊晓春,男,1984年生,工程师,主要从事地电阻率观测研究。E-mail:fanxiaochungis@163.com

李伟,通讯作者,男,1969年生,高级工程师,主要从事地震监测预报、地震观测系统维护的研究。

E-mail:553813216@qq.com

2020)。江宁台井下地电阻率观测自 2015 年 11 月正式观测以来已有 4 年多的观测数据,亟需对各种数据变化进行分析,如年变化、地铁干扰、可能与地震有关的变化、长趋势变化等。目前已有多个井下地电阻率观测在中强地震前出现异常的典型震例,如天水台井下地电阻率观测在四川芦山 M_s 7.0 地震前 11 天出现波动变化,岷县-漳县 M_s 6.6 地震前 41 天出现波动变化(高曙德,2016),平凉台井下地电阻率在四川九寨沟 M_s 7.0 地震前出现了持续 1 年的趋势异常变化(高曙德等,2017)等,但对中小地震前的地电阻率异常变化研究较少。南京地区位于长江下游-南黄海地震带,地震发生特点是震级小、频次高,震级以 M_L 2.0 左右地震为主,中强地震较少。2018 年 1 月~2020 年 4 月,江宁台周边发生多次有一定影响的 $M_L \geq 3$ 地震,如 2018 年 4 月 6 日安徽无为 M_L 4.1 地震、2019 年 3 月 2 日溧水地震震序列、2019 年 11 月 1 日安徽定远县 M_L 3.9 地震、2020 年 3 月 3 日江苏鼓楼区 M_L 3.4 地震。因此,在强地铁干扰下发现中小地震发生前井下地电阻率观测的异常变化是亟需研究的问题。本研究首先通过计算影响系数来评价江宁台井下地电阻率对地表浅层干扰抑制能力,结合观测数据分析井下地电阻率观测主要干扰源;然后,总结地铁运营对地铁干扰的影响变化及如何提取地铁干扰较少的数据;之后,对江宁台井下地电阻率观测 2018 年 10 月出现快速变化原因进行了分析;最后,通过夜间数据来分析江宁台井下地电阻率在中小地震发生前的微小变化,初步探讨其相关性。

1 台站基本情况

江宁台始建于 1978 年,位于现南京市江宁区禄口街道,地电阻率测区内地形高差不超过 2m,地貌属秦淮河冲积平原,以耕地和灌溉渠为主。测区构造单元为溧水中生代火山岩盆地,位于南京-湖熟断裂南西盘和方山-小丹阳断裂西盘的楔形地块上,东距茅山断裂带

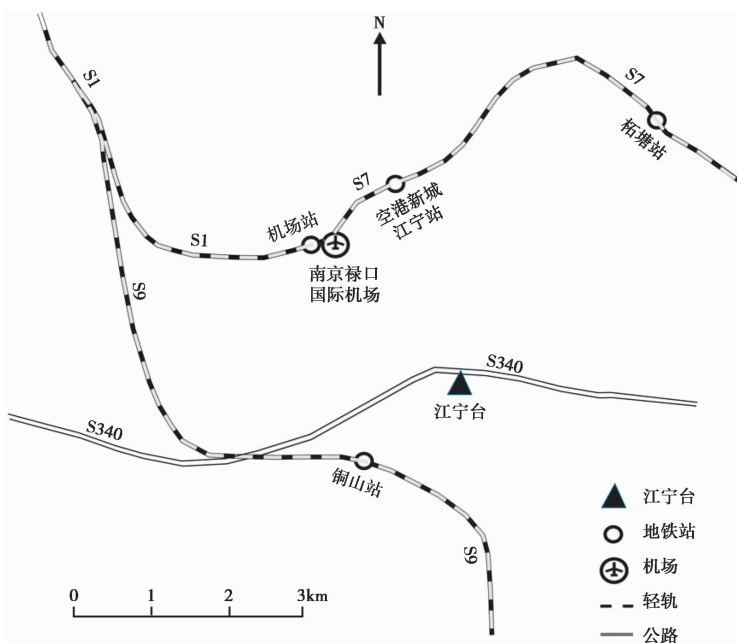


图 1 江宁台地理位置分布示意

30km,西北距长江36km。距江宁台4km范围内共有3条地铁和1条公路,分别为直线距离2.9km的地铁S1号线、直线距离1.5km的地铁S9号线、直线距离3.2km的地铁S7号线、S340公路(图1)。2014年江宁台在地表地电阻率布极区新建了井下地电阻率观测装置,电极在地面投影位置与地表布极位置基本相近,井下地电阻率于2015年11月开始正式观测,采用四极对称观测方式,布极呈十字状,如图2所示。2018年4月14日地表地电阻率观测停测,原地表观测装置用于交流地电阻率观测实验。供电极、测量极布设情况和装置系数见表1。

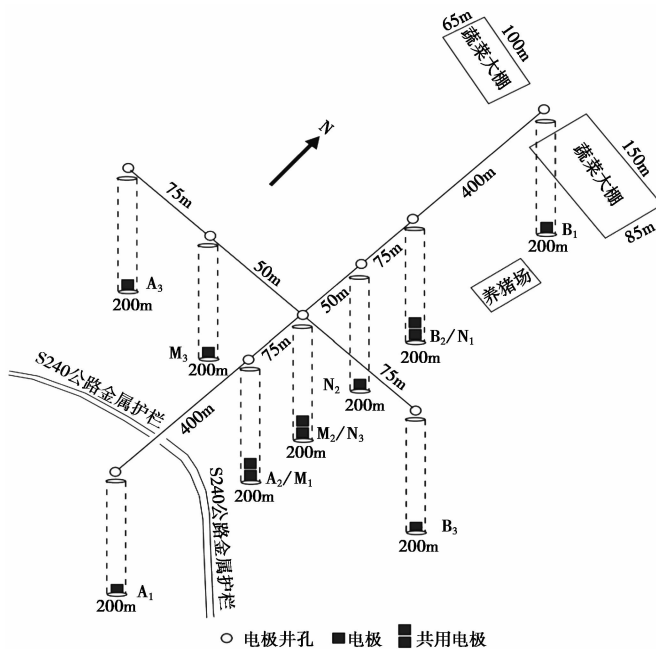


图2 井下观测布极示意

表1 江宁台井下地电阻率供电极、测量极布设情况和装置系数

供电极距 AB/km	测量极距 MN/km	方向	装置系数 K/m
1	0.2	NS	5151
0.2	0.05	NS	1172
0.2	0.05	EW	1275

2 井下地电阻率观测浅层地表抑制干扰能力研究

根据表2江宁台“K”型电性结构分别计算井下观测的各层介质影响系数,用 B_1 、 B_2 、 B_3 代表水平层状影响系数的第1~3层,各测道的各层影响系数如表3所示。据全国地电阻率观测台站多年的观测数据分析,在浅层介质影响系数绝对值不大于0.5%的情况下观测数据较平稳,季节性年变化幅度较小(解滔等,2016)。江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=200m$) 的 B_1 小于0.5%,其抑制浅层介质电阻率的变化干扰能力优于其他测道。井下地电阻率观

测 NS($AB = 200\text{m}$) 和 EW($AB = 200\text{m}$) 的 B_1 远小于井下地电阻率观测 NS($AB = 1000\text{m}$), 表明井下地电阻率短极距抑制浅层介质电阻率的变化干扰能力优于长极距。

表 2 江宁台电测深曲线反演的电性结构

NW—SE 测线		NS 测线	
层厚/m	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	层厚/m	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
30	36.29	30	18.45
230	144.52	230	335.67
∞	140.39	∞	80.58

表 3 江宁台井下地电阻率影响系数统计

测道	B_1		B_2		B_3	
	NW—SE	NS	NW—SE	NS	NW—SE	NS
NS($AB = 1000\text{m}$)		0.2216		0.1418		0.6366
NS($AB = 200\text{m}$)		0.0043		0.9080		0.0876
EW($AB = 200\text{m}$)	0.0095		0.8668		0.1237	

井下地电阻率观测 NS($AB = 200\text{m}$) 和 EW($AB = 200\text{m}$) 的 B_2 大于 NS($AB = 1000\text{m}$), 如果孕震作用引起第 2 层介质电阻率的变化, 则前者的映震能力优于后者。井下地电阻率 NS($AB = 1000\text{m}$) 的 B_3 大于 NS($AB = 200\text{m}$) 和 EW($AB = 200\text{m}$), 如果孕震作用引起第 3 层介质电阻率的变化, 则前者的映震能力优于后者(樊晓春, 2019a)。用 ρ_{NS} 、 ρ_{EW} 、 ρ_{NSK} 分别表示江宁台井下地电阻率观测 NS($AB = 200\text{m}$)、EW($AB = 200\text{m}$) 及 NS($AB = 1000\text{m}$) 的地电阻率, ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 分别表示 1、2、3 层介质电阻率; 其相对变化值可用下式表示

$$\frac{\Delta\rho_{\text{NS}}}{\rho_{\text{NS}}} = 0.0043 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.9080 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.0876 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\rho_{\text{EW}}}{\rho_{\text{EW}}} = 0.0095 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.8668 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.1237 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta\rho_{\text{NSK}}}{\rho_{\text{NSK}}} = 0.2216 \frac{\Delta\rho_1}{\rho_1} + 0.1418 \frac{\Delta\rho_2}{\rho_2} + 0.6366 \frac{\Delta\rho_3}{\rho_3} \quad (3)$$

计算江宁台井下观测 2017~2019 年的原始数据以及夜间 1~3 时转日均值数据的年变化幅度, 根据年变化幅度可表明浅层地表抑制干扰能力水平, 如表 4 所示。井下地电阻率观测 NS($AB = 200\text{m}$) 和 EW($AB = 200\text{m}$) 的原始数据的年变化幅度明显大于夜间 1~3 时转日均值数据的年变化幅度, 而长极距在入江苏省地震局前兆数据库前已经预处理, 原始数据和夜间 1~3 时转日均值相差较小。井下地电阻率观测 NS($AB = 200\text{m}$) 2017 年的年变化幅度接近 2018 年的 2 倍, 而夜间 1~3 时转日均值数据的年变化幅度相当, 可能与地铁 S7 号线、S9 号线的试运行有关。井下地电阻率观测 NS 和 EW($AB = 200\text{m}$) 年变化幅度较 NS($AB = 1000\text{m}$) 显著减小, 由公式(3)可得与其 B_1 相关的结论, 表明井地电阻率观测 NS 和 EW($AB = 200\text{m}$) 的浅层地表抑制干扰能力优于 NS($AB = 1000\text{m}$), 各测道的主要干扰源为地铁。

表 4 江宁台数据年变幅度统计

年份	井下地电阻率年变化幅度/%			井下地电阻率(夜间 1~3 时)年变化幅度/%		
	NS($AB=1000m$)	NS($AB=200m$)	EW($AB=200m$)	NS($AB=1000m$)	NS($AB=200m$)	EW($AB=200m$)
2017	1.575	0.336	0.151	1.339	0.089	0.078
2018	1.853	0.163	0.126	1.551	0.080	0.076
2019	2.084	0.126	0.137	1.329	0.087	0.052

3 数据变化分析

3.1 地铁干扰变化及数据处理

地铁作为动态干扰源,一般干扰周期为 120~180s,干扰频段集中在 0.1Hz 以下(张宇等,2016),干扰时间通常为地铁运营期间、电客车出库、入库和地铁轨道等日常维护时间段(1~2h)。地铁对地电阻率观测曲线的影响特征主要表现为正负脉冲型突跳、上升、下降等变化(樊晓春等,2020)。城市有轨直流轨道系统与地电阻率观测设施与环境之间最小距离的标准为 30km,截至 2019 年,江宁台井下地电阻率观测共有 5 条地铁线路超出该标准,最近的仅为 1.5km,另有 3 条地铁距江宁台 30~35km 范围内(樊晓春等,2016)(表 5)。江宁台井下地电阻率 3 个测道均具备一定的地表浅层抑制干扰能力,自 2015 年 11 月至 2020 年 4 月,未发现测区内蔬菜大棚、农田灌溉等对数据造成明显的影响。2017 年 3 月测区附近开始建设地铁 S7 号线、S9 号线后,数据变化幅度增大,较难发现小的变化。选取 2015 年 11 月至 2020 年 3 月 31 日的井下地电阻率数据,通过提取夜间数据代替日均值来分析对其数据变化。地铁最早开始运营时间为 05:47:00,最晚运营时间为 6:07:00,最早结束运营时间为 22:25:00,最晚结束运营时间为 23:27:00。根据地铁运营时间(表 5),加上日常维护时间,参考李伟(2007)和李鸿宇(2016)的剔除干扰方法,从观测数据中提取夜间 1~3 时的观测数据取均值代替 24h 日均值,并与原日均值比较。

表 5 南京市地铁早、晚班运营时刻表

线路	开通时间 (年-月)	站名	首班时刻 (时:分:秒)	末班时刻 (时:分:秒)	距离/km
1	2010-05	药科大学	05:47:00	23:27:00	21.1
2	2010-05	油坊桥	06:00:00	23:00:00	33.2
3	2015-04	秣周东路	06:00:00	23:00:00	18.6
10	2014-07	安德门	06:00:00	23:40:00	33.8
S1	2014-07	禄口机场	06:00:00	22:40:00	2.9
S3	2017-12	南京南站	06:00:00	23:00:00	30.2
S9	2017-12	铜山	06:07:00	22:28:00	1.5
S7	2018-05	空港新城江宁	06:00:00	22:25:00	3.2

由图 3(b)可以看出,与图 3(a)原日均值相比,各个测道夜间 1~3 时转日均值曲线较为光滑,更容易发现一些较小的数据变化。井下地电阻率 NS($AB=200m$)夜间 1~3 时转日均

值在 2017 年 9 月~2018 年 5 月期间变化幅度明显增大,与地铁 S7 号线和 S9 号线夜间试运行实验有关,当地铁 S7 号线和 S9 号线正式运营后,数据变化幅度减小。由各测道夜间 1~3 时转日均值曲线可以看出数据有多次突跳,各测道表现不一致,或上升或下降,持续时间为 1~2 天,间隔时间无明显规律。井下地电阻率观测 NS($AB=200\text{m}$)和 EW($AB=200\text{m}$)突跳次数少于 NS($AB=1000\text{m}$),可能与后者极距较长更容易受到地铁干扰有关。该突跳变化与常见的蔬菜大棚、农田灌溉引起的观测数据阶跃变化形态明显不同,而漏电引起的突跳变化也无法解释该变化,因此推测在观测场地环境未有大的变化时,突跳可能与地铁干扰有关,后经地铁公司确认,除了运营前后 1~2h 日常维护外,还有不定期(夜间 1~3 时)维护,主要包括轨道探伤车检查钢轨、接触网检测、运输设备等维护(樊晓春等,2020)。因此,在日常数据分析前,可以将突跳数据置为缺数。

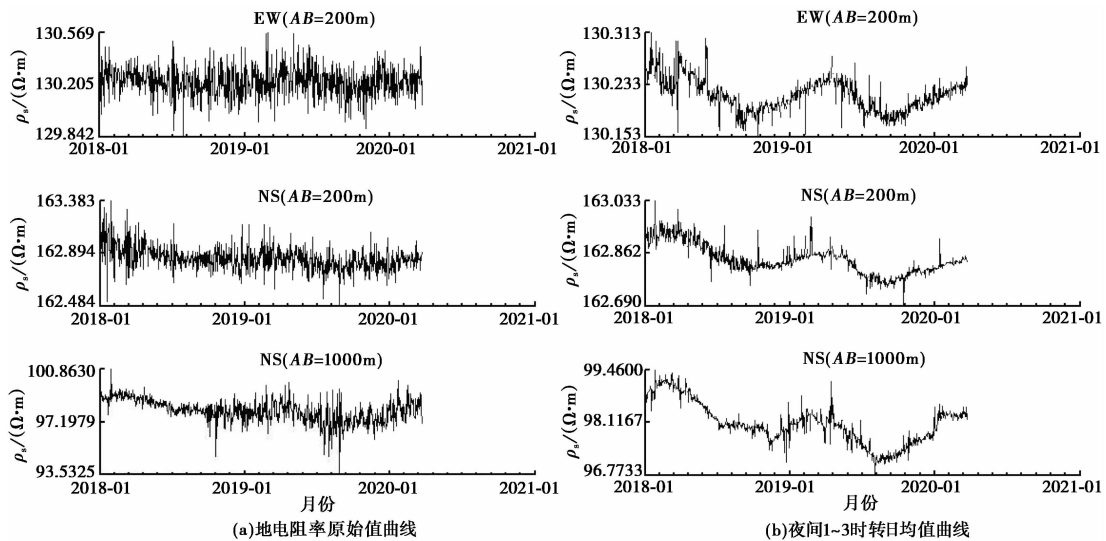


图 3 江宁台井下地电阻率日均值曲线

3.2 2018 年 10 月快速下降变化的分析

江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$)和 NS($AB=200\text{m}$)傅氏滑动去年变周期后,数据显示从 2018 年 10 月底开始出现趋势下降变化,最大下降幅度为 $0.46 \Omega \cdot \text{m}$,与 2015 年 11 月~2018 年 9 月出现的长趋势变化明显不同(图 4)。自 2018 年 4 月开始 S340 公路开始在路两边及中间安装金属护栏,直至 2018 年 12 月底完成,由于测区内金属导体可能会对数据造成一定干扰,需要进行异常排查。S340 公路金属护栏位于地表与井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$)南供电极 A_1 和 M_1 之间,施工要求测区段金属护栏须留有缺口,使得金属护栏分为左右两部分,该测道附近留有约 10m 缺口,场地布极情况与金属护栏相对位置见图 2。2019 年 12 月 12 日、2020 年 4 月 2 日 2 次江宁台异常期间,经检测各个金属护栏与地面接触桩测点的接地电阻范围在 $2.01 \sim 2.24 \Omega$,接地良好。为了分析该金属导体影响,决定采用实验方式验证 S340 公路的金属护栏对场地地表与井下地电阻率观测数据的影响。

实验方案采用导电优良的导线将左右两边金属护栏连接,通过观测连接前后地表与井下地电阻率数据变化来判定金属护栏是否影响(图 5(a)),其中虚线为实验连接导线。

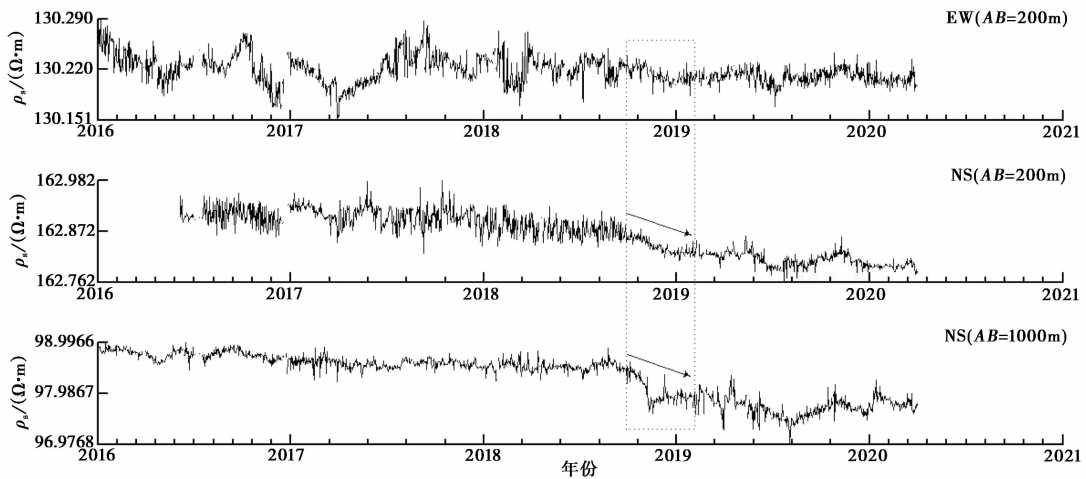


图 4 江宁台井下地电阻率 1~3 时转日均值去年变曲线

图 5(b) 为实验前后南供电电极 A 与南测量电极之间场地地表电性情况示意图, 其中 R_1 为南供电电极 A 与南测量电极之间电阻, R_2 为左侧金属护栏电阻, R_3 为右侧金属护栏电阻。

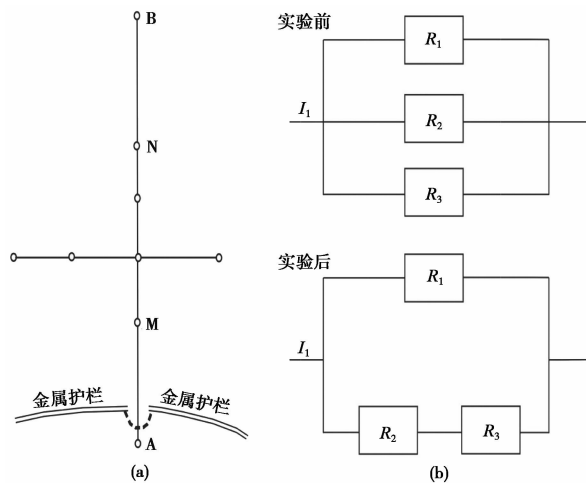


图 5 实验方案示意图

第 1 次实验时间为 2019 年 12 月 19 日 9:40~15:20, 图 6(a) 给出了实验前后的地表交流地电阻率整点值曲线, 可以看出实验期间, 地表交流地电阻率观测 $EW(AB=1000m)$ 数据出现明显下降(地表交流地电阻率观测 $NS(AB=1000m)$ 无明显变化, 图略), 最大下降幅度为 $0.16 \Omega \cdot m$, 而同时段的井下地电阻率观测数据由于受地铁干扰较强, 无法判定是否出现变化(参考图 6(c)、(d)、(e) 地铁运营运行期间观测数据)。分析认为当金属管线、蔬菜大棚、铁塔或公路护栏等作为金属导体进入地电观测区后, 电流将更多地被吸引到存在金属导体的位置, 周围产生附加电场, 而其他位置的电场将变弱(樊晓春等, 2018), 使得地表交流地电阻率观测 $EW(AB=1000m)$ 数据出现明显下降。

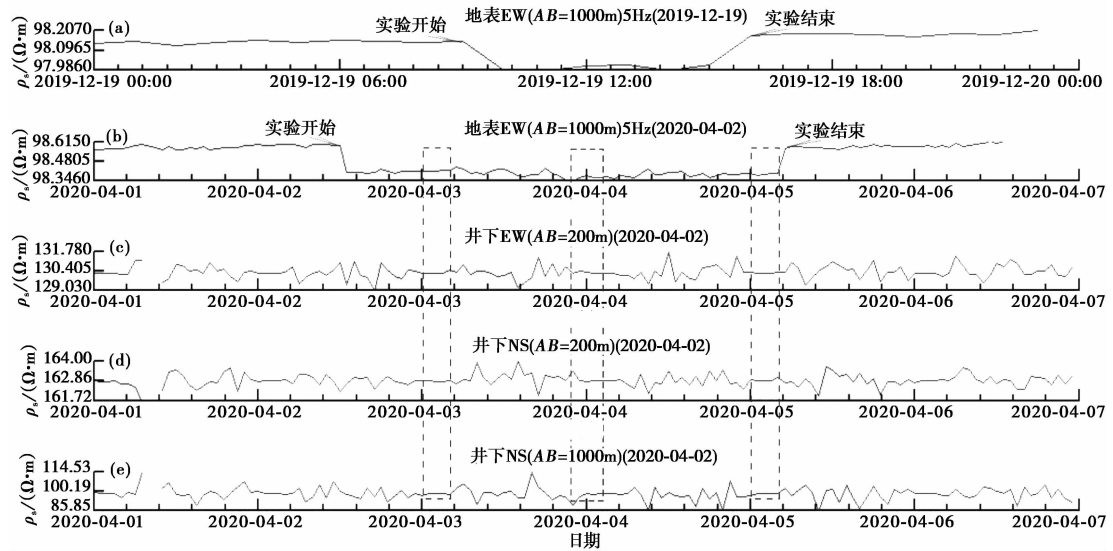


图 6 江宁台地表交流与井下直流地电阻率观测整点值

第 2 次实验时间为 2020 年 4 月 2 日 13:50~4 月 5 日 05:00,考虑到白天井下地电阻率观测受地铁干扰影响,利用 4 月 3 日、4 日、5 日夜间 1~4 时数据来判定金属护栏影响。图 6(c)、6(d)、6(e)给出了实验前后的井下地电阻率观测整点值曲线,可以看出实验期间,井下地电阻率观测 NS($AB = 1000\text{m}$)、EW($AB = 200\text{m}$)和 NS($AB = 200\text{m}$)夜间 1~4 时(虚线方框内)均无明显变化,而地表交流地电阻率观测 EW($AB = 1000\text{m}$)出现明显下降(地表交流地电阻率观测 NS($AB = 1000\text{m}$)无明显变化,图略),下降幅度为 $0.19 \Omega \cdot \text{m}$ (图 6(b))。

2 次实验期间均无降雨、农田灌溉等干扰,通过简单改变地表金属连接情况使得地表交流观测数据发生明显变化,表明金属护栏对地表交流地电阻率确实存在一定干扰影响。当测区金属导体与测道平行时,分流更为明显,对该测道观测数据影响更加明显,而当测区金属导体与测道垂直时,分流效果不及前者,电场变化幅度较小,对该测道观测数据影响较小,因而 2 次实验中地表交流 NS($AB = 1000\text{m}$)均未有明显变化(该曲线因无变化已省略)。而对于江宁台井下地电阻率观测,实验结果表明 S340 公路金属护栏对其影响较小。因此,江宁台井下地电阻率观测 NS($AB = 1000\text{m}$)和($AB = 200\text{m}$)自 2018 年 10 月开始出现的快速下降变化与金属护栏干扰相关的可能性较小。

3.3 “U”形变化分析

3.3.1 安徽无为 M_L 4.1 地震

江宁台井下地电阻率年变特征较明显,呈“夏低冬高”变化,2018 年 1 月井下地电阻率观测 EW($AB = 200\text{m}$)出现反年变周期下降,下降幅度为 $0.055 \Omega \cdot \text{m}$ 。经实地考察,周边无蔬菜大棚建设,农田无灌溉,观测场地环境除 S340 公路修建外未有明显变化,降雨也为正常水平。此后维持低值振荡变化,至 4 月 1 日出现转折上升,恢复至正常水平,呈现“U”形变化(图 7)。随后发生了 2018 年 4 月 6 日安徽无为 M_L 4.1 地震,震中距江宁台约 115km,在数据呈“U”形变化期间,测区 150km 范围内没有超过 M_L 3.0 的地震。因 2018 年 1~4 月测区内

新建 S340 公路,该公路路基宽 26m,位于地表和井下地电阻率南供电极 A_1 和 M_1 之间(图 2),推测该变化可能与公路干扰影响有关。但比较地表直流地电阻率观测 EW($AB=1000\text{m}$)和井下地电阻率观测 EW($AB=200\text{m}$)数据(2018 年 4 月 14 日后原地表直流地电阻率观测改为交流地电阻率观测),前者在公路建设期间未发现明显变化(地表直流地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$)无变化,图略),表明后者出现的“U”形变化与公路建设相关的可能性较小。井下地电阻率观测 EW($AB=200\text{m}$)夜间 1~3 时转日均值变化幅度极小,虽然该测道出现的“U”形变化幅度较小,但形态较明显,震前地电阻率下降后上升再到发震符合 DD 模式(Dilatancy-Diffusion model)预言的震源区电阻率变化过程。因此,认为该异常变化与 2018 年 4 月 6 日安徽无为 $M_L 4.1$ 地震存在一定的关联。

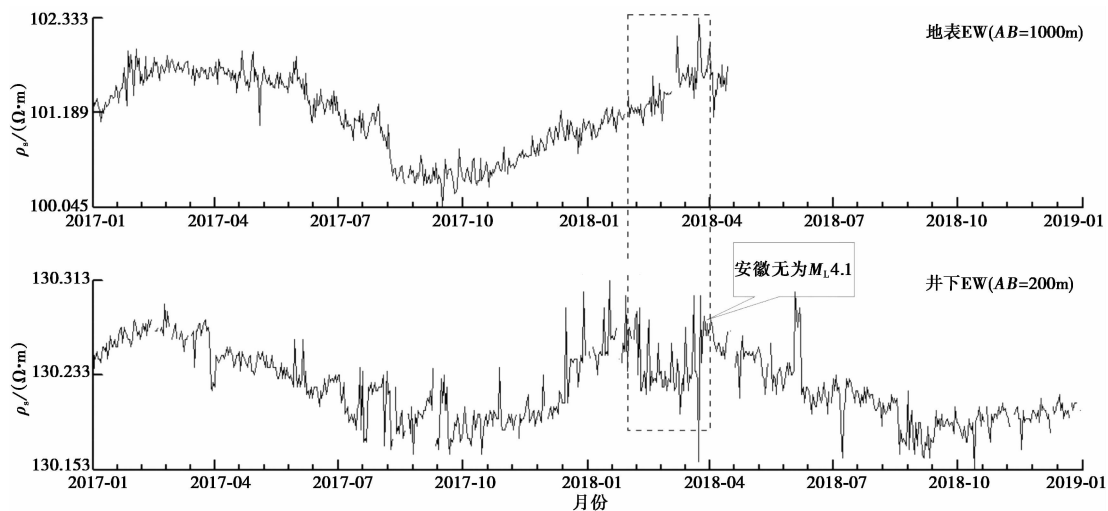


图 7 地表直流地电阻率与井下地电阻率日均值曲线

3.3.2 溧水地震序列

如图 8 所示,江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$)和($AB=200\text{m}$)自 2018 年 10 月底至 11 月下旬快速下降后一直处于振荡阶段,随后于 2019 年 3 月 2 日发生了溧水地震序列。该序列最大地震震中距江宁台约 20km,为 1970 年以来南京辖区最为显著的 1 次地震序列,南京市溧水区震感明显。溧水地震序列共计 21 次地震,最大震级为 $M_L 3.4$ 。其中, $M_L \geq 3.0$ 地震 3 次, $2.0 \leq M_L < 3.0$ 地震 3 次, $1.0 \leq M_L < 2.0$ 地震 8 次, $0.1 \leq M_L < 1.0$ 地震 7 次。该地震序列距茅东断裂和南京-湖熟断裂较近,距 1977 年 5 月 10 日江苏溧水 $M_L 4.6$ 地震约 3km,距 1979 年溧阳 $M 6.0$ 地震约 17km。序列中 2019 年 3 月 2 日 $M_L 3.4$ 地震、2019 年 4 月 6 日 $M_L 3.4$ 地震、2019 年 4 月 7 日 $M_L 2.9$ 地震震源机制一致性较好,与 1979 年 7 月 9 日溧阳 $M 6.0$ 地震震源机制相似,认为溧水地震序列可能与茅东断裂有一定关系,反映了该地区较高的应力水平。

该地震序列中 4 月 6 日 $M_L 3.4$ 地震发生前,江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$)和 NS($AB=200\text{m}$)出现 1 次“U”形变化。该变化表现为该地震序列中 3 月 2 日 $M_L 3.4$ 地震发生后数据快速下降至 3 月 31 日,下降幅度达 $0.57 \Omega \cdot \text{m}$,随后快速上升并恢复,于 4 月 6 日

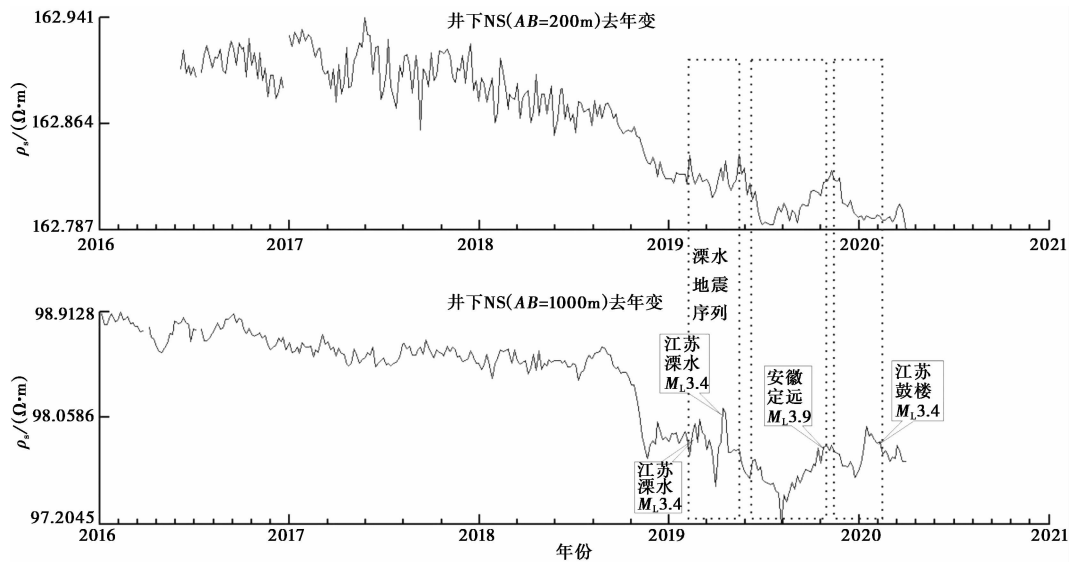


图 8 江宁台井下地电阻率 5 日均值曲线

发生了 $M_L 3.4$ 地震。自 2018 年 10 月以来,距江宁台 150km 范围内无较大影响地震发生,在初步排除了 S340 公路金属护栏干扰影响后,认为 2018 年 10 月以来江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$) 和 NS($AB=200\text{m}$) 的快速变化及 4 月 6 日前出现的“U”变化可能与溧水地震序列有关。

3.3.3 安徽定远 $M_L 3.9$ 地震

江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$) 和 NS($AB=200\text{m}$) 自 2019 年 4 月中旬至 8 月中旬期间处于快速下降状态,最大下降幅度为 $0.7 \Omega \cdot \text{m}$,随后快速上升,到 10 月底恢复正常后,数据呈“U”形变化,于 2019 年 11 月 1 日在距江宁台约 148km 的安徽滁州市定远县发生了 $M_L 3.9$ 地震(图 8)。江宁台井下观测 NS 向 2 个测道数据呈“U”形变化期间,未见测区环境变化,距江宁台 150km 范围内无较大影响地震发生,震前地电阻率变化符合 DD 模式预言的震源区电阻率变化过程,但由于该地震震级较小且距离较远,其机理还需要进一步讨论。

3.3.4 江苏鼓楼 $M_L 3.4$ 地震

如图 8 所示,江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$) 自 2019 年 11 月上旬至 2020 年 1 月底呈现“U”形变化,最大变化幅度为 $0.343 \Omega \cdot \text{m}$,随后一直处于快速下降,于 2020 年 3 月 3 日在距江宁台约 45km 的江苏南京市鼓楼区发生 $M_L 3.4$ 地震。该地震震源深度约 10km,为有仪器记录以来南京主城区发生的最大地震。地震发生后,鼓楼区、栖霞区、玄武区普遍有较强的震感。该地震发生前江宁台井下地电阻率测区未见环境有明显变化,距江宁台 150km 范围内无较大地震发生,认为井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$) 震前变化与该地震相关的可能性较大。江宁台井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$) 和 NS($AB=200\text{m}$) 变化略有不同,后者自 2019 年 11 月上旬开始一直处于下降状态,原因可能与极距较小有关。

4 讨论与结论

(1) 地表浅层抑制干扰能力。

江宁台井下地电阻率观测电极埋深达 200m, 其观测极距既有 1000m 的长极距, 也有 200m 的短极距。影响系数计算结果表明, 其短极距具备较强的地表浅层抑制干扰能力, 而长极距仍可能受到较强的地表干扰。自 2015 年 11 月正式观测以来, 实际观测数据表明, 长、短极距观测除地铁干扰和仪器故障外未受到较明显的地表浅层干扰。测区内 S340 公路金属护栏对地表与井下地电阻率观测的干扰影响实验结果表明, S340 公路金属护栏对江宁台井下地电阻率干扰影响较小, 对地表地电阻率交流观测干扰影响较显著, 当测区金属导体与测道平行时, 对数据影响较大, 上升或下降与金属导体所处位置相关; 当测区金属导体与测道垂直时, 对该测道观测数据影响较小, 与王同利等的(2017)结论一致。考虑到金属护栏及公路干扰影响较复杂, 对于公路自身和金属护栏对地电阻率干扰影响是否存在抵消还缺少分析, 因实验时间较短, 今后还需要进一步分析研究。

(2) 趋势变化。

江宁台井下地电阻率电极埋深达 200m, 但受表层介质电阻率的季节性变化显著, 井下观测随夏季降雨量的增加, 表层介质含水率升高, 地表介质电阻率降低, 故引起地电阻率观测值降低, 而冬季降水量减少, 表层介质电阻率上升, 视电阻率观测值升高, 表现出“夏低冬高”的正常年变形态(樊晓春, 2019b)。从长趋势来看, 自观测以来 3 个测道均呈现长趋势下降变化, 其中井下地电阻率观测 NS($AB=1000\text{m}$) 和 NS($AB=200\text{m}$) 趋势变化较为明显。以距江宁台 200km 范围内的苏 16 井、苏 18 井、溧阳上兴观测站和苏 22 井的水位作为对比, 2018 年 1 月至 2020 年 1 月各个深井的水位均同样呈现下降趋势。虽然部分深井的水位下降可能与近 2 年的降雨量减少有关, 但本文认为大范围的水位下降有较大可能与区域应力调整有关。地电阻率长趋势变化通常反映了岩石孔隙率的变化, 与构造引起的水位变化相似, 反映了周围区域应力场的变化(沈红会等, 2017、2020)。因此, 大范围深井水位与江宁台井下地电阻率数据下降变化一致反映了区域应力场的变化。自 2018 年 10 月开始快速下降变化后, 江宁台周围地震强度明显增强, 如溧水地震序列、江苏鼓楼 $M_L 3.4$ 地震。其中江苏鼓楼 $M_L 3.4$ 为南京主城区有仪器记录以来最大的有感地震, 震中附近 499 年 8 月 4 日曾发生过 $M4\frac{3}{4}$ 地震。

(3) 映震能力初步探讨。

目前, 井下地电阻率观测的震例较少, 尤其是中小地震前的异常变化。江宁台井下地电阻率观测在 2018 年 4 月 6 日安徽无为 $M_L 4.1$ 地震、2019 年 3 月 2 日溧水地震序列、2019 年 11 月 1 日安徽定远 $M_L 3.9$ 地震、2020 年 3 月 3 日江苏鼓楼 $M_L 3.4$ 地震发震前均出现了“U”形变化, 排除 S340 公路金属护栏及地铁干扰后, 认为“U”形变化与上述地震具有一定的相关性。本文认为江宁台井下地电阻率的上述变化与 DD 模式预言的震源区电阻率变化过程较一致。地震断层的破裂长度 L 可通过公式(4)来计算(郭增建等, 2000)

$$\lg L = \frac{M - 2.56}{2.97} \quad (4)$$

以安徽无为 $M_L 4.1$ 地震为例, 破裂长度小于 3km, 考虑到地震断层影响范围为其破裂长

度的 2~3 倍,则其地震断层影响范围最大仅有 9km 左右。江宁台距该地震震中约 115km,距震源较远,本文认为引起其井下地电阻率观测 EW ($AB = 200\text{m}$) 地电阻率变化的原因可能为大范围区域应力场与震源区共同作用所致,并非与震源破裂直接相关。

另外,与井下地电阻率观测 NS ($AB = 200\text{m}$) 相比,江宁台井下地电阻率观测 NS ($AB = 1000\text{m}$) 在震前能够更加明显地观测到“U”形变化。根据公式(3)可知,如果孕震作用引起第 3 层介质电阻率的变化,则井下长极距的映震能力要优于井下短极距。由于江宁台井下地电阻率观测时间较短,正式观测以来仅发现 5 次“U”形变化。同时,考虑到上述地震震级偏小,震级和发震时间与地电阻率的异常幅度、异常时间的相关性及其变化机理还需要更多“U”形变化做进一步分析。

致谢: 中国地震局兰州地震研究所杜学彬研究员、中国地震局地震预测研究所赵家骝研究员、中国地震局台网中心叶青高级工程师、甘肃省地震局安海静高级工程师、江苏省地震局沈红会、李鸿宇高级工程师对本文提出了建议和意见,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- 高曙德,郭安宁,王军燕,等,2017. 四川九寨沟 $M_s 7.0$ 地震前地电阻率的异常变化. 地震工程学报, **39**(4):645~651.
- 樊晓春,李伟,袁慎杰,等,2020. 地铁对井下地电阻率观测的影响分析——以江宁台为例. 地震工程学报, **42**(3):680~687.
- 樊晓春,吴帆,袁慎杰,2018. 江宁地电台深井地电阻率观测系统分析. 地震地磁观测与研究, **39**(3):102~106.
- 樊晓春,吴帆,袁慎杰,等,2019a. 江宁地电台地表与井下地电阻率观测数据分析. 地震地磁观测与研究, **40**(5):63~69.
- 樊晓春,解滔,吴帆,等,2019b. 井下地电阻率观测影响系数分析——以江宁地震台为例. 中国地震, **35**(2):347~358.
- 樊晓春,徐徐,蔡艺,等,2016. 南京市地震观测环境保护专项规划探讨. 国际地震动态, (7):21~26.
- 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.
- 郭增建,秦保燕,2000. 某些震源问题的讨论. 地震, **20**(1):103~109.
- 李鸿宇,袁桂平,沈红会,2016. 地电阻率观测中地铁干扰剔除方法. 地震地磁观测与研究, **37**(5):61~65.
- 李伟,孙春仙,田韬,等,2007. 解决地电台站受电磁干扰的一种有效尝试. 防灾科技学院学报, **9**(4):46~49.
- 沈红会,李鸿宇,袁慎杰,等,2014. 江宁台地电场地地铁干扰实验结果分析. 地震, **34**(3):125~131.
- 沈红会,王丽,王维,等,2017. 地电阻率长期趋势变化及其预测意义. 地震学报, **39**(4):495~505.
- 沈红会,祝涛,孙春仙,等,2020. 江苏地电阻率预测指标研究. 中国地震, **36**(1):115~125.
- 王同利,李妍,武晓东,等,2017. 延庆台地电阻率铁质干扰的有限元模拟. 地震学报, **39**(4):520~530.

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.

张宇,张兴国,王兰炜,等,2016. 新型地电阻率交流观测系统研究及江宁台观测实验. 地震学报,38(5):807~810.

Preliminary Analysis of Resistivity Variation in Deep-well Observation at the Jiangning Seismic Station

*Fan Xiaochun*¹⁾ *Li Wei*²⁾ *Bao Haiying*³⁾ *Dong Miao*⁴⁾ *Wu Fan*¹⁾ *Yuan Shenjie*⁵⁾

1) Nanjing Earthquake Monitoring and Early Warning Center, Nanjing 210008, China

2) Nanjing Seismic Station, Nanjing 210014, China

3) Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China

4) Xinyi Seismic Station, Xinyi 221400, Jiangsu, China

5) Jiangning District Earthquake Office, Nanjing 210014, China

Abstract The URRT can cause great impacts on the deep-well resistivity observation. In this paper we analyzed the resistivity variation and discuss the mechanism by extracting the night data of geo-electrical resistivity in Jiangning Seismic Station. The results show that: ① the deep-well observation of Jiangning station has good inhibition to surface and shallow interference, and the main source of interference for deep-well observation is the URRT. ② The sudden change of data from 01 to 03 at night is related to the irregular maintenance of the URRT. ③ The rapid decline of the deep-well geo-electrical resistivity observation NS ($AB = 1000\text{m}$) and ($AB = 200\text{m}$) in October 2018 may not be related to the metal guardrail of S340 highway, and the earthquake intensity around Jiangning station is obviously enhanced. ④ The decrease of the long trend of the deep-well geo-electrical resistivity is consistent with the change of water level in the surrounding deep well, which reflects the change of regional stress adjustment. ⑤ The “U” change of the deep-well geo-electrical resistivity EW ($AB = 200\text{m}$) before the Anhui Wuwei $M_L 4.1$ earthquake is not related to the newly built S340 highway. ⑥ There are 5 “U” changes in the deep-well geo-electrical resistivity of Jiangning station, which we believe that it is very likely to be related to earthquakes.

Keywords: Geo-electrical resistivity; Deep-well observation; URRT; Earthquake