第 40 卷　第 4 期　　地　震　学　报　　Vol. 40, No. 4
2018 年 7 月　(481-490)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Jul., 2018

唐宝琳，朱涛，胡哲，周建国. 2018. 江宁地电台的电性结构及关于地电阻率观测值的解释. 地震学报，**40**(4)：481-490. doi: 10.11939/jass.20170128.
Tang B L, Zhu T, Hu Z, Zhou J G. 2018. Electrical structure and its application to the explanation of georesistivity observations at Jiangning geoeletric station. *Acta Seismologica Sinica*, **40**(4): 481-490. doi: 10.11939/jass.20170128.

江宁地电台的电性结构及关于地电阻率观测值的解释*

唐宝琳[1)]　朱　涛[1,2)]　胡　哲[3)]　周建国[1,2),†]

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所
2) 中国北京 100081 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室
3) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要　为了探究地表和井下观测的地电阻率值存在的明显差异，本文首先对江宁地电台电性结构进行了探测，并建立了水平层状电性结构模型；然后基于该模型计算了地表和井下观测装置的理论视电阻率值；最后对比分析计算值与观测值. 结果表明，地表大供电极距观测装置和井下观测装置的观测值均可以由地下电性结构进行合理解释，即地表与井下观测值的差异是合理的，是由地下电性结构所决定的.

关键词　地电阻率　电性结构　电阻率层析成像　电阻率测深
doi: 10.11939/jass.20170128　　**中图分类号**：P315.72+2　　**文献标识码**：A

Electrical structure and its application to the explanation of georesistivity observations at Jiangning geoeletric station

Tang Baolin[1)]　Zhu Tao[1,2)]　Hu Zhe[3)]　Zhou Jianguo[1,2),†]

1) *Institute of Geophysics*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100081, *China*
2) *Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging*, *Beijing* 100081, *China*
3) *Institute of Crustal Dynamics*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100085, *China*

Abstract: In order to probe the significant difference between the surface and deep well georesistivity observations, the electrical structure beneath Jiangning geoelectric station was detected, and a horizontally layered electrical structure model was proposed in this paper. Subsequently, we used the model to calculate the apparent resistivity for each configuration of surface and deep-well observation systems. Comparison of calculated georesistivities, with observed ones shows that the observations of the surface configurations with a long-distance current electrodes and those of deep-well configurations can be reasonably interpreted, that is to say, the difference between the surface and deep-well observations is reasonable, which is resulted from the different electrical structure beneath Jiangning station.

* **基金项目**　国家自然科学基金(41574083)资助.
收稿日期　2017-06-07 收到初稿，2017-08-28 决定采用修改稿.
† **通信作者**　e-mail: jgzhou163@163.com

Key words: georesistivity; electrical structure; georesistivity tomography; resistivity sounding

引言

地震的孕育和发生会导致地电阻率发生明显的异常变化(杜学彬，2010；陈军营等，2015；杜学彬等，2015；郭安宁等，2015；彭玉柱等，2015)．自 1966 年邢台地震后，地电阻率作为一种前兆参量在我国地震监测预报工作中一直发挥着重要的作用．然而，随着经济的飞速发展，地电阻率观测环境受到了严重的破坏，地电阻率观测数据的质量也随之降低．为了减少或者消除各种人文因素带来的影响，一些地震电阻率的观测方法被重新进行试验，其中多极距观测方法是比较重要的一种，例如赵和云和钱家栋(1987)利用水平层状介质模型及其响应系数理论对四川郫县台 1984 年 5 种不等极距的实测资料进行反演，得到更为直观的各层视电阻率曲线；钱家栋和赵和云(1988)以及钱家栋等(2007)对国内台站的观测结果也表明多极距观测系统有利于更好地研究电阻率异常随时间的演化过程；王兰炜等(2011)采用 ZD8MI 电阻率多极距观测系统在山丹地震台的试验观测情况显示，该地区浅层和深层地电阻率变化存在较大差异，并由此得出多极距观测系统有助于干扰的排除和地震电阻率机理的研究．此外，也有部分研究人员利用井下观测的方式进行地电阻率研究，例如孟庆武和阎洪朋(1991)利用深井电阻率观测的方式对临沂台的地电阻率进行监测，并得到电阻率异常更为明显的结果；王兰炜等(2014，2015)的观测结果也表明井下观测可以减少地表干扰的影响，提高观测精度．就本文研究的江宁地电台而言，地表观测装置的地电阻率观测数据在地铁运行时段较地铁非运行时段的信噪比显著降低．为了降低地铁运行对地电阻率观测值的干扰，本文进行了井下观测试验．观测结果表明，在同一观测方向上，井下与地表观测装置的观测值存在明显差异．尽管这种差异可能是由两种观测方式采用了不同的观测极距致使探测深度和范围产生差异所造成，但还有待证实．

为了探究造成地表与井下地电阻率观测值之间差异的原因，本文拟首先对江宁地电台的电性结构进行探测；然后根据探测结果，建立江宁地电台的等效水平层状电性结构模型，最后，利用建立的模型计算地表和井下观测装置下的视电阻率值，并与相应观测装置下的观测值进行对比分析，以期对地下电性结构产生原因进行解释．

1 江宁地电台简况

1.1 地质简况

江宁地电台位于南京市江宁区南部，靠近南京市溧水区．研究区内地貌属秦淮河冲积平原，地形开阔平坦；无大河、深沟及其它大型水体，仅有规模较小的灌溉沟渠和小池塘，深度较浅，常年蓄水，水位变化较小；地下水位埋深浅，属于平原地区潜水类型．通过分析钻孔资料可知，观测区内第四系覆盖层厚度小于 20 m；下伏全风化—中风化凝灰岩层，厚度约为 40 m；深至约 200 m 处为弱—微风化凝灰岩层．江宁地电台位于溧水中生代火山岩盆地内，近场区内发育有南京—湖熟断裂、方山—小丹阳断裂和茅山断裂(图 1)．

南京—湖熟断裂是第四纪中更新世活动断裂(熊振等，2011)，历史上该断裂附近曾发生过 5 次破坏性地震：公元 499 年 8 月 4 日和公元 548 年 10 月 27 日南京 $M4\frac{3}{4}$和 $M5\frac{1}{4}$地震、1679 年 12 月 26 日溧阳 $M5\frac{1}{4}$地震以及 1974 年 4 月 12 日和 1979 年 7 月 9 日溧阳上沛 $M_S5.5$ 和 $M_S6.0$ 地震，该断裂北东盘的小震活动明显强于南西盘(熊振等，2011；王恩宁，黄震芳，1993)．方山—小丹阳断裂在燕山运动时期活较为动强烈，上新世早期又复活，引起了方山、

斧山玄武岩喷发(薛怀民等，2015)．沿该断裂有小震活动，自 1984 年以来，每一二年均有小震发生．茅山断裂晚第三纪以来有活动，是全新世一条重要的活动断裂(王斌等，2008)，在该断裂附近曾发生过多次地震，例如 1839 和 1974 年 $M5.5$，1977 年 $M_S4.1$ 和 1979 年 $M_S6.0$ 地震(王恩宁，黄震芳，1993；王斌等，2008；刘建达等，2009)．

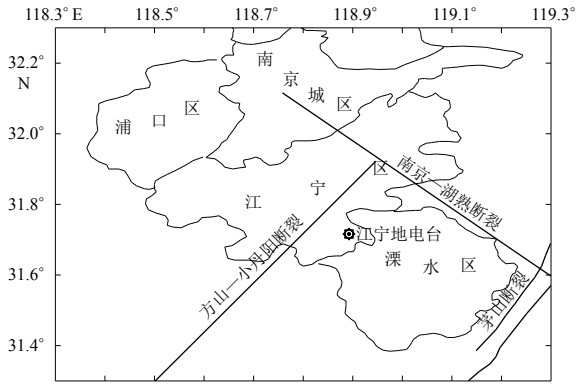

图 1　江宁地电台位置和近场区主要断裂示意图

Fig. 1　Location of Jiangning geoelectric station and main faults in its adjacent regions

1.2　地电阻率观测

江宁地电台最初只有地电阻率地表观测系统，观测装置分别为南北向(供电极距 AB=1 000 m，观测极距 MN=300 m；AB=100 m，MN=16 m)和东西向(AB=1 000 m，MN=300 m)．由图 2 所示的 2017 年 4 月的地表大供电极距的地电阻率观测结果表明：在地铁运行时段的地电阻率观测数据受到明显的干扰，在运行时段 6:00—23:00 的地电阻率观测值相对于停运时段 0:00—5:00，尤其是 1:00—3:00 时段的低电阻率值的波动幅度明显增大(图 2c 和图 2d)；图 2a 和 2b 中观测值的均方根误差在地铁运营时段比非运营时段整体上至少增大了 1 倍，其中南北向基本上从小于 0.5 Ω·m 增大到大于 1.0 Ω·m，东西向则基本上增大到 3.0 Ω·m 以上．由于每天 1:00—3:00 时段的均方根误差相对较低，南北向和东西向观测值的平均均方根误差分别为 0.072 Ω·m 和 0.12 Ω·m，分析研究时采用观测的平均值代表各观测装置下的观测值．

为了降低地铁干扰的影响，在江宁地电台进行井下观测试验．观测装置分别为南北向(AB=1000 m，MN=200 m；AB=200 m，MN=50 m)和东西向(AB=200 m，MN=50 m)；电极埋深(井深)为 200 m；与地表观测装置一样，取 2017 年 4 月每天 1:00—3:00 时段的观测平均值作为各观测装置下的观测值．

地表观测装置测得南北向(两组供电和观测极距)和东西向观测平均值分别约为 128.26 Ω·m(图 2c)，24.53 Ω·m(图 2e)和 101.64 Ω·m(图 2d)，井下观测平均值分别约为 98.99 Ω·m(图 2h)，162.94 Ω·m(图 2f)和 130.25 Ω·m(图 2g)．可以看出，相同供电极距和观测极距下，井下观测南北向的观测值(图 2f)明显大于东西向的值(图 2g)，与地表观测结果(图 2c，2d)一致．而在相同测量方向上，对比图 2c 与 2h 和 2d 与图 2g 可得：南北向的井下观测装置(AB=1 000 m，MN=200 m)的观测值明显低于地表观测装置(AB=1 000 m，MN=300 m)的观测值，东西向井下观测装置(AB=200 m，MN=50 m)的观测值明显高于地表观测装置(AB=1 000 m，MN=300 m)的观测值．

2　江宁地电台电性结构探测与模型的建立

2.1　电性结构探测

2016 年 4 月，根据江宁地电台观测区域的实际情况，布设了两条电阻率层析成像(高密度电阻率法)测线，分布如图 3 所示：一条测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 走向为 NW-SE，起止的坐标为(31.719 4°N，118.887 7°E)和(31.714 7°N，118.902 5°E)，长约 1 530 m；另一条测线 L_{NS} 走向为近 NS 向，起

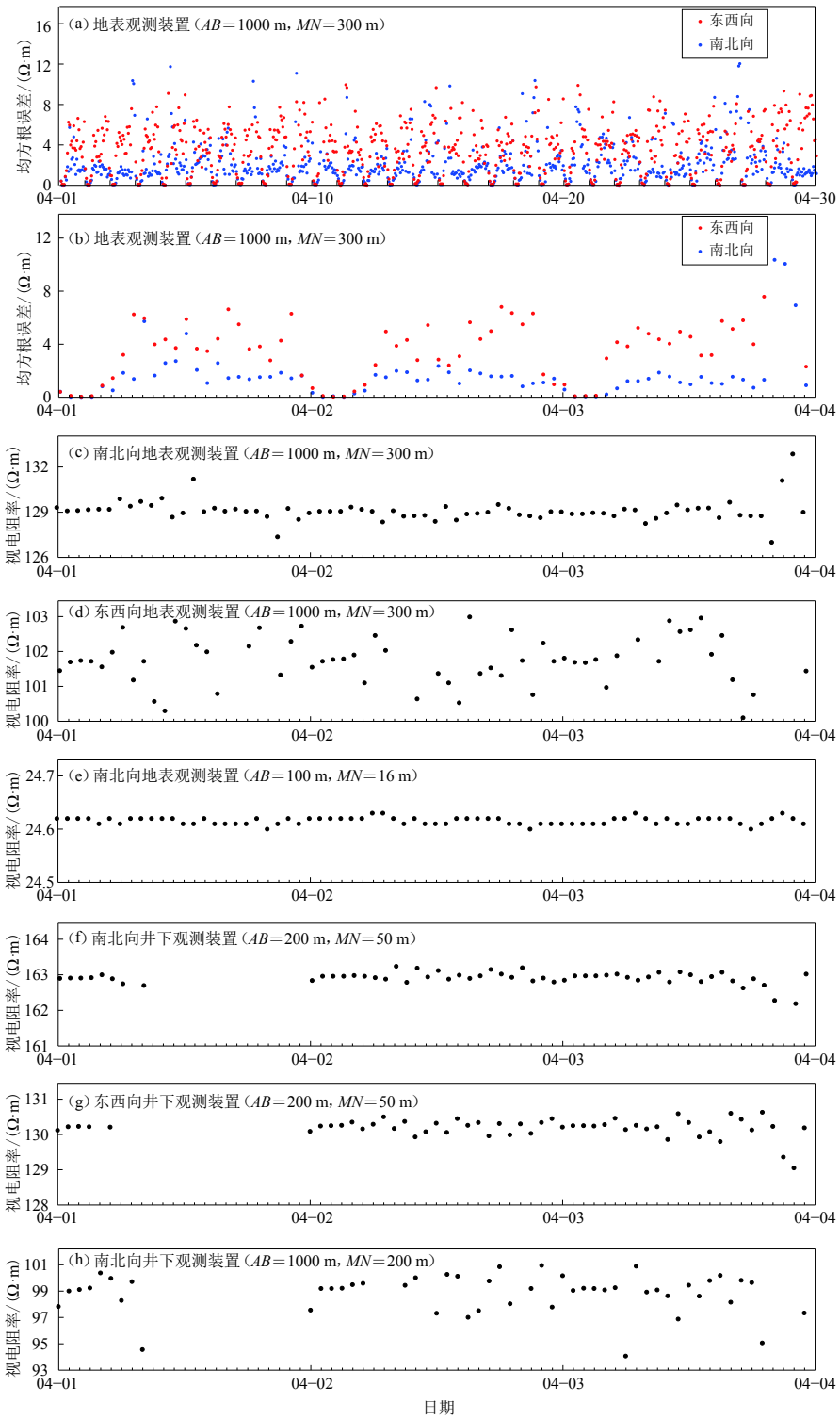

图 2 2017 年 4 月江宁地电台地电阻率观测值及其均方根误差

Fig. 2 Georesistivity observations and their root-mean-squares errors at Jiangning station during April of 2017

止坐标为(31.705 3°N，118.891 4°E)和(31.719 7°N，118.893 4°E)，长约1 670 m．测线数据采集使用德国 DMT 公司制造的 RESECS II 直流电法仪．该仪器属于分布式观测系统，每个通道最多可以控制 960 个电极．为了抑制随机干扰，采用 80 次叠加测量和抗电干扰能力相对较强的温纳 α 观测装置(Zhu *et al*，2017)．两条测线的电极间距均为 6 m．测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 的电极为 256 个，测线 L_{NS} 为 280 个．利用 Garmin 公司 Vista 型手持 GPS 对每个电极位置进行定位，其基准地图为 WGS84．所得测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 和 L_{NS} 的视电阻率剖面如图 4 所示．

在江宁地电台测区内的近东西和南北向共有 11 个钻孔，其分布位置见图 3，钻孔深度约为 200 m，但是只有钻孔 QZ_1 和 QZ_2 的柱

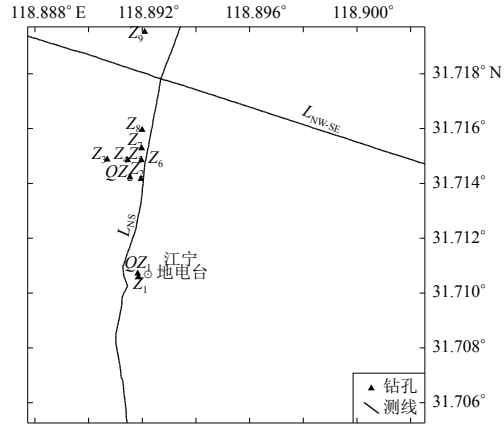

图 3　测线布设和钻孔分布图

Fig. 3　Layout of resistivity measuring lines and boreholes distribution

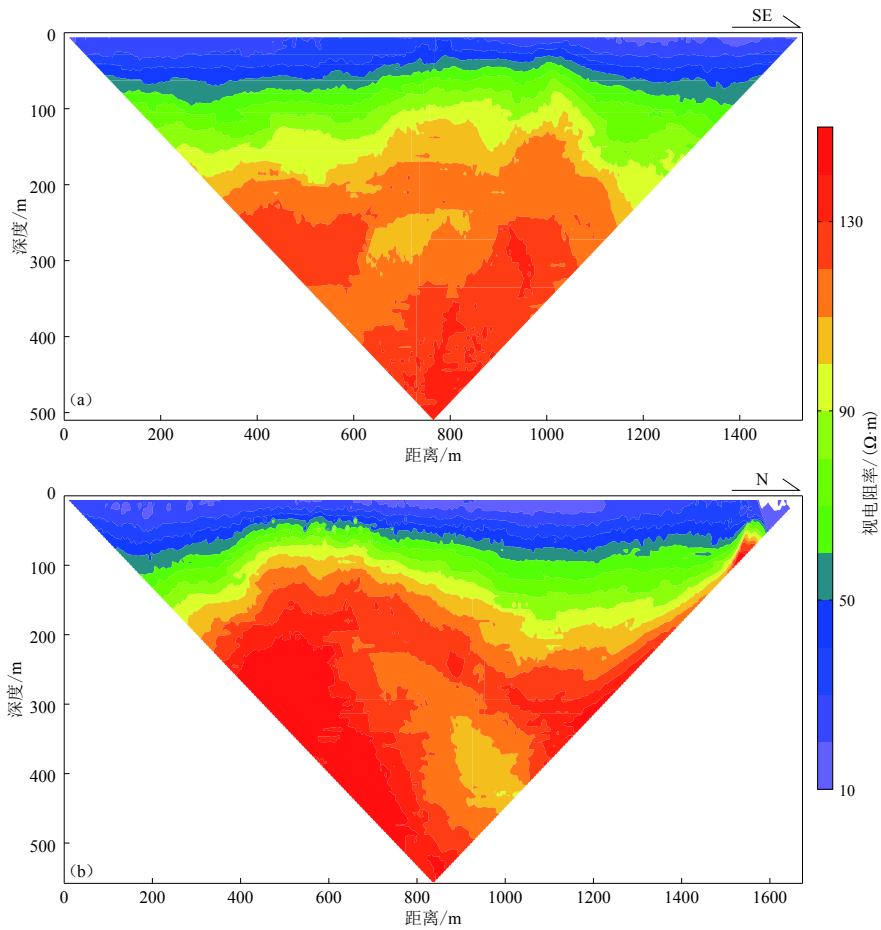

图 4　测线 $L_{NW\text{-}SE}$ (a)和 L_{NS} (b)的视电阻率剖面图

Fig. 4　The apparent resistivity sections of the measuring lines $L_{NW\text{-}SE}$ (a) and L_{NS} (b)

状图记录完整．钻孔 QZ_1 的岩性柱状图显示：探测区域的岩性分布由浅至深分别为粉质黏土、全风化凝灰岩、强风化凝灰岩、中风化凝灰岩和微风化凝灰岩，中、强风化凝灰岩层底部埋深约为 40 m（表 1）．

表 1 钻孔 QZ_1 的岩性描述

Table 1 Lithology revealed by borehole QZ_1

钻孔深度/m	岩性	描述	钻孔深度/m	岩性	描述
1.80	粉质黏土	可塑，切面稍光滑，韧性和干强度中等，表层 20 cm为素填土，含植物根系	12.00	强风化凝灰岩	坚硬，凝灰质结构，块状构造，岩芯较破碎，呈碎裂状
6.20	粉质黏土	硬塑，切面光滑，韧性和干强度高	37.36	中风化凝灰岩	坚硬，凝灰质结构，块状构造，岩芯较完整，呈柱状
10.30	全风化凝灰岩	岩石分化成黏土状，夹少量强风化碎块	197.06	微风化凝灰岩	坚硬，凝灰质结构，块状构造，岩芯较完整，呈柱状

本文以图 4 所示的测线 $L_{\text{NW-SE}}$ 和 L_{NS} 的视电阻率剖面作为初始模型，利用骄佳技术公司的 RTomo 6.0 软件反演获得了相应的电阻率图像，如图 5 所示．对比图 4 与图 5，可以看出反演电阻率图像中代表中、强风化层的分界面的深度与该层真实分界面埋深（40 m）非常接近，

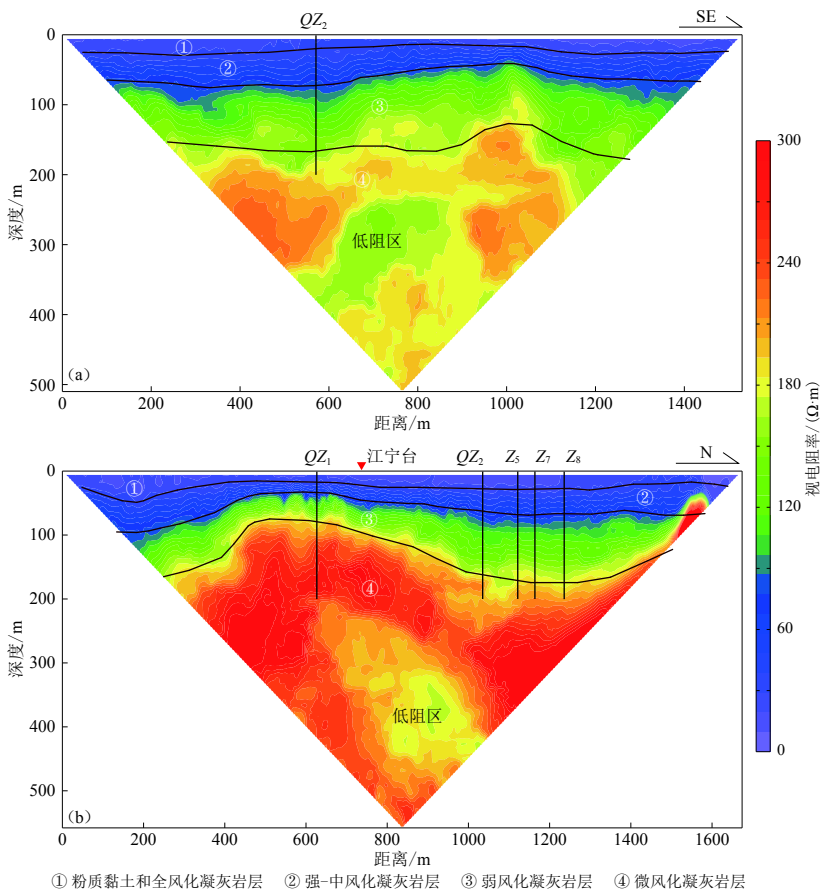

图 5 测线 $L_{\text{NW-SE}}$（a）和 L_{NS}（b）的反演电阻率剖面

Fig. 5 The inverted resistivity images of measuring lines $L_{\text{NW-SE}}$ (a) and L_{NS} (b)

因此反演的电阻率图像中的典型结构分层深度基本上可以代表江宁地电台的地质分层深度.

由图 5 可以看出，在 200 m 以内，可以将探测区域分为：浅表覆盖层①，其岩性为粉质黏土和全风化的凝灰岩层；强风化层②，其岩性为中、强风化的凝灰岩；弱风化层③和微风化层④，其岩性为弱、微风化的凝灰岩．它们之间具有非常明显的分界面，而且层内的电性结构基本均匀，但其的层厚不均一，存在明显的变化．在 200 m，特别是 250 m 更深的区域，电性结构并没有继承 200 m 以浅的分层均匀特征，而是具有强烈的横向变化，并且存在明显的低电阻率区域．对比图 5a 与图 5b 可以看出，微风化层④中，L_{NS} 的电阻率值基本上高于测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 的电阻率值，这与图 4 所示的视电阻率剖面相一致.

2.2　电性结构模型

为了解释地表和井下观测装置所获取的观测值，本文尝试建立江宁地电台的等效的水平层状电性结构模型．对测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 进行 84 个测量极距对的数据采集，供电极距 AB 分别为 18，36，…，1 512 m，对应的测量极距 MN 分别为 6，12，…，504 m；对测线 L_{NS} 进行了 91 个测量极距的数据采集，供电极距 AB 分别为 18，36，…，1 638 m，对应的测量极距 MN 分别为 6，12，…，546 m．所得两测线的电测深曲线如图 6 所示，可见 $L_{NW\text{-}SE}$ 的视电阻率值基本在 40—110 Ω·m 之间，L_{NS} 的值基本处于 15—130 Ω·m之间．两条测线的视电阻率曲线均具有 K 型特征，换言之，根据该探测结果，可以将江宁地电台的电性结构等效为 3 层水平层状结构，且每层的电阻率值具有 $\rho_1<\rho_2>\rho_3$（ρ_i 为第 i 层的电阻率值，i=1，2，3）的关系.

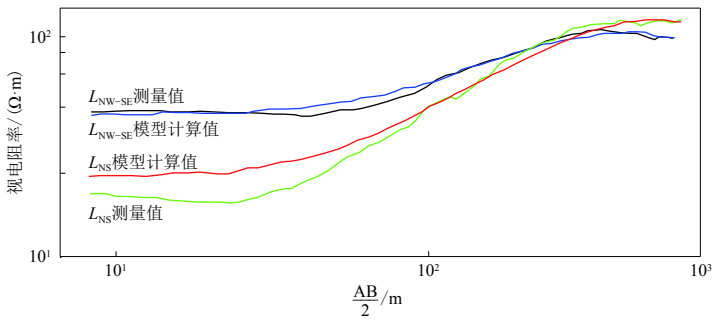

图 6　测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 和 L_{NS} 的电测深曲线及相应的解释模型曲线

Fig. 6　Resistivity sounding curves and their interpreted results of measuring lines $L_{NW\text{-}SE}$ and L_{NS}

综合分析图 5 电阻率层析成像结果和图 6 电测深结果，可以推断出江宁地电台的电性结构为：第一层厚度约为 30 m，第二层厚度约为 230 m．与表 1 中的钻孔记录进行对比可知，第一层电性结构包含了粉质黏土和全风化的凝灰岩层，第二层包含强风化和微风化的凝灰岩层．测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 的电性结构为：第一层的电阻率值为 10—30 Ω·m；第二层为 30—250 Ω·m；第三层为 100—200 Ω·m（图 5a），因此，$L_{NW\text{-}SE}$ 的初始电性结构模型参数可取值为：第一层厚度 30 m，电阻率 20 Ω·m；第二层厚度 230 m，电阻率为 140 Ω·m；第三层电阻率 150 Ω·m．测线 L_{NS} 的电性结构为：第一层的电阻率值为 10—30 Ω·m；第二层为 30—300 Ω·m；第三层为 100—250 Ω·m（图 5b）．因此，L_{NS} 的初始电性结构模型参数可取值为：第一层的厚度 30 m，电阻率 20 Ω·m；第二层的厚度 230 m，电阻率 165 Ω·m；第三层的电阻率 175 Ω·m.

根据电测深数据解释的正演计算方法（姚文斌，1989；程志平，2007）和自动迭代解释的

表 2 电性结构的最佳模型参数

Table 2 Optimal model parameters of electrical structure

测线	层序号	层厚/m	电阻率/(Ω·m)
$L_{NW\text{-}SE}$	1	29.40	39.29
	2	220.94	143.06
	3	∞	60.39
L_{NS}	1	24.56	18.71
	2	203.42	274.52
	3	∞	54.79

阻尼最小二乘法程序(姚文斌，1989)对图 6 所示的两测线测量值进行解释，获得的最佳模型参数列于表 2. 两测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 和 L_{NS} 的模型计算值对观测值拟合的均方根误差分别为 3.31 Ω·m 和 6.04 Ω·m. 为了提高计算精度，在利用模型参数正演计算某一观测装置的视电阻率时，采用了韦柳椰等(2006)的测量极距 $MN\neq0$ 的视电阻率计算公式和姚文斌(1989)提供的理论对称四极装置的约翰逊滤波器.

3 地震电阻率观测值的解释

根据江宁地电台的等效水平电性结构模型(表 2)，可计算出地表和井下观测装置的理论视电阻率值，将其与观测值进行对比分析，便可探讨造成地表与井下观测装置观测值差异的原因.

对地表观测装置下观测到的视电阻率，可以采用电测深数据解释的正演计算方法(姚文斌，1989；程志平，2007)来进行计算. 而本文所用的地表观测装置分别为南北向(AB=1 000 m，MN=300 m；AB=100 m，MN=16 m)和东西向(AB=1 000 m，MN=300 m)，相应的观测值分别约为 128.26 Ω·m(图 2c)、24.53 Ω·m(图 2e)和 101.64 Ω·m(图 2d). 在此采用表 2 所示的解释测线 $L_{NW\text{-}SE}$ 和 L_{NS} 测量值的最佳模型参数来分别计算东西向和南北向观测装置的理论视电阻率值，结果显示南北向(AB=1 000 m，MN=300 m)为 127.92 Ω·m，南北向(AB=100 m，MN=16 m)为 34.20 Ω·m 和东西向(AB=1000 m，MN=300 m)为 104.18 Ω·m. 对比观测结果可得，理论值相对于观测值的百分比偏差(绝对值)分别为 0.27%，39.42% 和 2.50%. 由此可见，对于地表大供电极距观测装置，理论计算结果与观测值相差很小(<3%).

对于井下观测装置下的视电阻率的计算，采用葛为中(1994)的地下点源正演计算公式. 对电位积分的数值计算采用与地表观测装置相同的线性滤波器，即提供的理论对称四极装置的约翰逊滤波器(姚文斌，1989)，$MN\neq0$ 时的视电阻率计算公式(韦柳椰等，2006). 由于在江宁地电台的地震电阻率井下观测中，电极埋深 200 m，观测装置分别为南北向(AB=1 000 m，MN=200 m；AB=200 m，MN=50 m)和东西向(AB=200 m，MN=50 m)，相应的地电阻率观测值分别为约 98.99 Ω·m(图 2h)，162.94 Ω·m(图 2f)和 130.25 Ω·m(图 2g). 利用表 2 中的最佳电性结构模型参数，计算出相应观测装置的视电阻率分别为 94.41 Ω·m，160.52 Ω·m 和 124.56 Ω·m，与观测值的百分比偏差(绝对值)分别为 4.63%，1.49% 和 4.37%. 由此可见，井下观测的电阻率值也可以利用江宁地电台电性结构来进行合理的解释.

4 讨论与结论

为了降低地铁对江宁台地电阻率观测的干扰，在江宁地电台进行了井下地电阻率观测试验. 然而，地表与井下观测值的显著差异给地电阻率观测人员对观测结果的理解、分析及解释带来了困惑. 为了探寻造成这种差异的原因，本文利用电阻率层析成像和电测深探测结果建立了江宁地电台的等效水平层状电性结构模型，并利用建立的模型计算了地表和井下观测装置下的视电阻率. 通过对比分析每一个观测装置的观测值和模型计算值，合理地解释了

地表大供电极距观测装置与井下观测装置的观测结果差异，为理解和解释江宁地电台地表和井下地电阻率观测值提供了依据．

电阻率层析成像探测结果（图 4 和图 5）表明，江宁地电台的电性结构呈非水平层状，因此，水平层状电性结构模型不能完全反映江宁地电台的真实电性结构，这可能是导致地表小供电极距观测装置（AB＝100 m，MN＝16 m）的观测值与模型计算值存在显著差异的原因．若要进一步探讨这个问题，则需建立江宁地电台二维甚至三维电性结构模型．

地电阻率研究中，可能会试验和采用越来越多的地震电阻率观测方式来降低甚至消除各种电磁干扰对地电阻率观测的影响，会面临与江宁地电台因不同观测方式而导致观测值出现明显差异的情况，本文的思路和方法可以为其提供参考和借鉴．

中国地震局地壳应力研究所王兰炜研究员提供了观测数据，对数据进行了详细的解释，南京市江宁区地震办公室赵庆福为本文提供了钻孔资料，并在电阻率层析成像和电测深数据采集过程中提供了帮助和支持，审稿专家为本文提出了建设性的意见和建议，作者在此一并表示感谢．

参　考　文　献

陈军营，刘君，刘宝勤，范莹莹，崔腾发．2015．2013 年岷县漳县 M_S6.6 地震前大地电磁视电阻率变化[J]．地震，**35**(4)：109–118．

Chen J Y，Liu J，Liu B Q，Fan Y Y，Cui T F．2015．Magnetotelluric apparent resistivity changes before the 2013 Minxian-Zhangxian M_S6.6 earthquake[J]．*Earthquake*，**35**(4)：109–118（in Chinese）．

程志平．2007．电法勘探教程[M]．北京：冶金工业出版社：46–56．

Cheng Z P．2007．*Course for Electrical Exploration*[M]．Beijing：Metallurgical Industry Press：46–56（in Chinese）．

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．

Du X B．2011．Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction[J]．*Science China Earth Sciences*，**54**(1)：145–156．

杜学彬，刘君，崔腾发，范莹莹，安张辉，闫睿，王丽．2015．两次近距离大震前成都台视电阻率重现性、相似性和各向异性变化[J]．地球物理学报，**58**(2)：576–588．

Du X B，Liu J，Cui T F，Fan Y Y，An Z H，Yan R，Wang L．2015．Repeatability，similarity and anisotropy changes in apparent resistivity recorded by station Chengdu at near distances before two great earthquakes[J]．*Chinese Journal of Geophysics*，**58**(2)：576–588（in Chinese）．

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．

Ge W Z．1994．The forward solution of the electrical field due to a point source in layered media and its applications[J]．*Acta Geophysica Sinica*，**37**(S1)：534–541（in Chinese）．

郭安宁，郭志宇，赵乘程，任栋，吴建华．2015．2013 年甘肃岷县漳县 M_S6.6 地震及短临前兆的显现[J]．地震工程学报，**37**(4)：981–985．

Guo A N，Guo Z Y，Zhao C C，Ren D，Wu J H．2015．Minxian-Zhangxian M_S6.6 earthquake in Gansu（2013）and its short-term and impending precursors[J]．*China Earthquake Engineering Journal*，**37**(4)：981–985（in Chinese）．

刘建达，李清河，张元生，金淑梅．2009．江苏中、南部及邻区地震重新定位及在断层研究中的应用[J]．地球物理学进展，**24**(1)：58–66．

Liu J D，Li Q H，Zhang Y S，Jin S M．2009．Hypocenter relocation in central and southern Jiangsu Province and adjacent areas，China and its application to fault research[J]．*Progress in Geophysics*，**24**(1)：58–66（in Chinese）．

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[J]．西北地震学报，**13**(4)：70–74．

Meng Q W，Yan H P．1991．Anomalous changes of resistivity in deep wells observed at Linyi station and its relation to earthquakes[J]．*Northwestern Seismological Journal*，**13**(4)：70–74（in Chinese）．

彭玉柱，张世民，李建章. 2015. 中强地震前周至台地电阻率的异常变化[J]. 震灾防御技术，**10**(2)：455–463.

Peng Y Z，Zhang S M，Li J Z. 2015. Precursory anomalies of geo-resistance before moderate-strong earthquake based on observed data at Zhouzhi seismic station[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*，**10**(2)：455–463 (in Chinese).

钱家栋，赵和云. 1988. 地电阻率的数值模拟和多极距观测系统[J]. 地震学报，**10**(1)：77–89 .

Qian J D，Zhao H Y. 1988. Earth resistivity modelling and observational system with multi-seperation of electrodes[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**10**(1)：77–89 (in Chinese).

钱家栋，毛先进，赵家骝. 2007. 地电阻率多极距观测试验研究[J]. 地震，**27**(增刊)：9–18.

Qian J D，Mao X J，Zhao J L. 2007. Experimental study on multi-separation array geo-electrical resistivity observation[J]. *Earthquake*，**27**(S1)：9–18 (in Chinese).

王斌，梁雪萍，周健. 2008. 江苏及其周边地区断裂活动性与地震关系的分析[J]. 高原地震，**20**(1)：38–43.

Wang B，Liang X P，Zhou J. 2008. Analysis on relationship between fault activity and earthquakes in Jiangsu Province and its adjacent areas[J]. *Plateau Earthquake Research*，**20**(1)：38–43 (in Chinese).

王恩宁，黄震芳. 1993. 南京地区的地震活动与地震小区划[J]. 南京师大学报：自然科学版，**15**(2)：81–87.

Wang E N，Huang Z F. 1993. On the seismic activity and subarea in Nanjing area[J]. *Journal of Nanjing Normal University*：*Natural Science*，**15**(2)：81–87 (in Chinese).

王兰炜，朱旭，朱涛，张世中，刘大鹏，胡哲，张宇. 2011. 地电阻率多极距观测系统及试验研究[J]. 地震，**31**(1)：19–31.

Wang L W，Zhu X，Zhu T，Zhang S Z，Liu D P，Hu Z，Zhang Y. 2011. Multi-separation array geo-electrical resistivity observation system and its experimental observation[J]. *Earthquake*，**31**(1)：19–31 (in Chinese).

王兰炜，张世中，张宇，胡哲，颜蕊. 2014. 井下地电阻率观测中装置系数的计算：以天水地震台井下观测为例[J]. 工程地球物理学报，**11**(1)：50–59.

Wang L W，Zhang S Z，Zhang Y，Hu Z，Yan R. 2014. Calculation of the configuration coefficient in the deep-well geo-electrical resistivity observation: Taking deep-well observation of Tianshui earthquake station as an example[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*，**11**(1)：50–59 (in Chinese).

王兰炜，张宇，张世中，颜蕊，王子影，张兴国，胡哲. 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.

Wang L W，Zhang Y，Zhang S Z，Yan R，Wang Z Y，Zhang X G，Hu Z. 2015. The status of deep-well geo-electrical resistivity observation in China[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*，**36**(2)：95–102 (in Chinese).

韦柳椰，吕玉增，阮百尧. 2006. *MN*不等于零时水平层状大地直流电阻率测深曲线的计算[J]. 物探化探计算技术，**28**(1)：26–28.

Wei L Y，Lü Y Z，Ruan B Y. 2006. The computation of DC resistivity sounding curves on horizontal layered earth based on *MN* unequal to zero[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*，**28**(1)：26–28 (in Chinese).

熊振，李清河，王良书，周彩霞. 2011. 南京地区地球物理场与地震构造稳定性[J]. 地震学报，**33**(5)：624–636.

Xiong Z，Li Q H，Wang L S，Zhou C X. 2011. Analysis on geophysical fields and seismic structural stability in Nanjing region[J]. *Acta Seismologica Sinica*，**33**(5)：624–636 (in Chinese).

薛怀民，马芳，曹光跃. 2015. 长江中下游地区晚中生代橄榄玄粗岩系列火山岩：年代学格架、地球化学特征及成因讨论[J]. 地质学报，**89**(8)：1380–1401.

Xue H M，Ma F，Cao G Y. 2015. Late Mesozoic Shoshonotic volcanic rocks in the middle and lower Yangtze river reaches：Ages，geochemical and genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*，**89**(8)：1380–1401 (in Chinese).

姚文斌. 1989. 电测深数值计算和解释入门[M]. 北京：地震出版社：18–20，66–68.

Yao W B. 1989. *Numerical Calculation and Explanation of Resistivity Sounding for Beginner*[M]. Beijing：Seismological Press：18–20，66–68 (in Chinese).

赵和云，钱家栋. 1987. 郫县台多极距观测资料的反演和分析[J]. 中国地震，**3**(增刊1)：73–78.

Zhao H Y，Qian J D. 1987. Inversion and analysis of data of temporal change in apparent resistivity with multi-separations in Pixian stations，Sichuan Province[J]. *Earthquake Research in China*，**3**(S1)：73–78 (in Chinese).

Zhu T，Zhou J，Wang H. 2017. Localization and characterization of the Zhangdian-Renhe fault zone in Zibo city，Shandong Province，China，using electrical resistivity tomography (ERT)[J]. *J Appl Geophys*，**136**：343–352.