**文章编号:** 1001-1749(2019)01-0068-12

# 不同噪声水平高密度电法的分辨率和勘探深度研究

邢润林<sup>1,2,3</sup>,陈儒军<sup>1,2,3</sup>,刘海飞<sup>1,2</sup>,王小杰<sup>1,2,3</sup>,陈兴生<sup>1,2,3</sup>

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院,长沙 410083;

2. 中南大学 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室,长沙 410083;

3. 湖南强军科技有限公司,长沙 410083)

摘 要:电位噪声是影响高密度数据采集质量进而影响反演成像解释可靠性的重要因素。通过 模拟四种不同水平电位噪声并获得噪声数据,对比分析四种装置(温纳装置、三极装置、偶极装 置、温纳一施伦贝谢装置),在噪声条件下的反演模型电阻率差异,并评估各装置对噪声响应的灵 敏程度以及不同噪声水平对反演模型分辨率和各装置的勘探深度的影响。将反演模型分辨率和 各装置勘探深度进行了量化,定量分析模型分辨率和不同装置勘探深度在各噪声水平下的变化 规律,综合评估噪声对四种装置反演模型分辨率和勘探深度的影响得出:①偶极和三极装置对噪 声灵敏程度较高,而温纳和温施装置对噪声灵敏程度相对较低;②噪声对深层地电模型分辨率影 响较大,在有效分辨地电模型的深度范围内,温纳和温施装置的模型分辨率降低 2/5,三极装置 降低一半,偶极装置降低 3/5 左右;③勘探深度在噪声影响下均有所减小,温纳和温施装置减小 约 1/4,偶极和三极装置减小约 1/3。

关键词: 电位噪声; 最小二乘反演; 分辨率; 勘探深度 中图分类号: P 631.3 文献标志码: A DOI:10.3969/j.issn.1001-1749.2019.01.11

0 引言

高密度电阻率法是以岩土体的电阻率差异为基础,通过研究人工直流电场作用下地下传导电流的 变化分布规律,来了解地下介质的电性变化规律、划 分地电断面,进而解决有关地质、水文地质和工程地 质等问题。该方法集电剖面法和电测深法于一体, 被称为电阻率成像(electrical resistivity tomography, ERT)技术<sup>[1-2]</sup>。为提高该方法解释的精 度和可靠性,必须控制野外观测数据质量和最小化 各种噪声对观测数据的影响。研究观测数据的噪声 特性和噪声响应对反演成像结果的影响非常重要。 数据质量和数据噪声水平是决定解释可靠性的关键 因素。不同噪声水平对反演成像结果的影响在国内 研究甚少。一般情况下,噪声来源分为两种:①电极 位置误差;②观测电位误差<sup>[3]</sup>。电极位置误差可以 通过准确布极,使误差在采集过程中最小化。电位 误差的影响是不可控的,电极接触不良,电缆绝缘层 破损,电网传输,仪器操作不规范等都会导致电位误 差的产生。LaBrecque等<sup>[4]</sup>研究了噪声对 ERT 数 据反演结果的影响,得出反演过程中噪声会导致数 据拟合精度变差;Dahlin 等<sup>[1,3]</sup>针对不同装置在两 种反演方法下的分辨率特性做了一系列模拟;Martorana 等<sup>[5]</sup>模拟和对比了一系列装置的地电模型分 辨率;Szalai<sup>[6]</sup>提出装置勘探深度的大小也是影响反

**收稿日期**: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(41774149)

**第一作者: 邢润林(1990-),男,硕士,主要研究方向为应用地球物理,**E-mail:1442923110@qq.com。

演成像质量的一个重要因素。国内对不同装置勘探 深度的研究比较多,晏月平<sup>[7]</sup>简要分析了三极装置 电极距与勘探深度的关系;肖宏跃等<sup>[8]</sup>对比分析了 温纳和偶极装置的勘探深度,并指出两种装置对高 阻体反演获得的深度比实际勘探深度浅;田玉民 等<sup>[9]</sup>通过采空区探测的实例及使用高密度电法资料 圈定采空区的工程钻探验证结果,认为高密度电法资料 圈定采空区和无常式。

### 1 设置装置

高密度电法不同装置对异常体的识别能力不尽 相同,能够从不同侧面反映异常体结构特征。一般 而言,较大电极距a(a表示相邻电极间的距离,单位 m)和隔离系数n的装置能够探测相对较深的地电 信息,而较小电极距a和隔离系数n的装置能够获 得浅层相对较大的水平分辨率。为了对比不同噪声 条件下各装置对地电模型的探测能力,以及不同噪 声水平对各装置探测能力的影响,考虑到高密度电 法野外作业所选装置的实用性和高效性,选择了传 统的温纳装置(WN),三极装置(PD),偶极装置 (DD),温纳一施伦贝谢(温施或WS)装置,各装置 参数见表1。数据点个数能够反映出各装置获取地 电信息的能力,数据点个数越大,所获取的地电信息 越丰富。电极数41,单位电极距1m。

1)温纳装置的横向和纵向灵敏度均较低。该装置的装置系数为  $2\pi a$ ,相对低于其他装置的装置系数,所以其信号强度要强于其他传统装置。该装置只能依靠 a 来扩大测量点数,所以相对而言温纳装置测量次数最少(图 1)。温纳排列装置设置 6 组, #1 装置  $a_{max} = 8a$  表示最大的供电极距,供电极距 由 a 依次增加到 8a; #2 到 #6 装置类似。考虑到 其布极过程所获得数据点个数方面的局限性,采用 尽量大的  $a_{max}$ 来增大数据点个数,进而获得更多的 地电信息。

2) 三极装置有较好的水平分辨率,隔离系数的

存在有效地增大了该装置的勘探深度,数据点数相 对于其他三种装置更大,所以能够获得更加丰富的 地电信息。三极装置设置8组, #1装置:当 a<sub>max</sub> = a 时,隔离系数 n 由 1 依次增大到35; #2 到 #8 类似。 3)偶极装置对水平方向电阻率的变化非常灵

敏。当电极距和隔离系数增大时,偶极装置的装置

表1 各装置参数设置以及相应的数据点个数

Tab. 1 Geometric parameters and the number of data points for each configuration designed

装置类型	排列	几何参数	数据点个数
温纳	#1	$a_{\rm max} = 8a$	220
	#2	$a_{\rm max} = 9a$	234
	#3	$a_{\max} = 10a$	245
	#4	$a_{\rm max} = 11a$	253
	#5	$a_{\rm max} = 12a$	258
	#6	$a_{\rm max} = 13a$	260
三极	#1	$a_{\max} = a$ , $n_{\max} = 32$	752
	#2	$a_{\max} = 2a, n_{\max} = 20$	951
	#3	$a_{\max} = 3a, n_{\max} = 16$	1078
	#4	$a_{\max} = 4a, n_{\max} = 12$	1089
	#5	$a_{\max} = 5a, n_{\max} = 10$	1105
	#6	$a_{\max} = 6a, n_{\max} = 8$	1069
	#7	$a_{\max} = 7a$ , $n_{\max} = 6$	976
	#8	$a_{\max} = 8a, n_{\max} = 4$	808
偶极	#1	$a_{\max} = a$ , $n_{\max} = 32$	720
	#2	$a_{\max} = 2a, n_{\max} = 20$	894
	#3	$a_{\max} = 3a, n_{\max} = 16$	995
	#4	$a_{\max} = 4a, n_{\max} = 12$	985
	#5	$a_{\max} = 5a, n_{\max} = 10$	981
	#6	$a_{\max} = 6a, n_{\max} = 8$	929
	#7	$a_{\max} = 7a$ , $n_{\max} = 6$	830
	#8	$a_{\max} = 8a, n_{\max} = 4$	672
温施	#1	$a_{\max} = a$ , $n_{\max} = 32$	380
	#2	$a_{\max} = 2a, n_{\max} = 20$	551
	#3	$a_{\max} = 3a, n_{\max} = 16$	641
	#4	$a_{\max} = 4a, n_{\max} = 12$	665
	#5	$a_{\max} = 5a, n_{\max} = 10$	679
	#6	$a_{\max} = 6a, n_{\max} = 8$	668
	#7	$a_{\max} = 7a, n_{\max} = 6$	626
	#8	$a_{\max} = 8a, n_{\max} = 4$	542

系数逐渐变小,但相对其他三个装置的装置系数依 然是最大的,所以大极距偶极装置信号强度较其他 三个装置弱。

4)温施装置是由温纳装置和施伦贝谢装置的结 合体。该装置既具有温纳装置的垂直分辨能力,还 具有施伦贝谢装置的水平分辨能力。该装置电极位 置分布和偶极装置比较相似,但分辨率较偶极装置 低。信号强度低于温纳装置,高于偶极和三极装置。



Fig. 1 The number of data points for each array configuration

## 2 电位噪声模拟

数值模拟计算是地球物理勘探理论研究工作重 要的组成部分,同时也是实际应用工作的重要组成 部分。比较不同装置在不同地质条件下的勘探效 果,特别是针对一些特定目标体的勘探任务,对于考 量不同探测深度、分辨能力、可操作性、野外作业开 销等因素选择最优装置有重要意义。

#### 2.1 地电模型

Res2Dmod 软件通过有限单元法将地下介质剖 分为一系列矩形网格,然后赋予不同电阻率值来模 拟地下的地电结构<sup>[10]</sup>。为了研究不同水平噪声对 高密度电法反演成像、不同装置的模型分辨率和勘 探深度的影响,在前人所建模型的基础上做了部分 修改,采用 res2Dmod 建立了两个电阻率模型(图 2),模型  $\pm 1$ :左上方是一个 25  $\Omega$ ·m 的低阻块(4 m \*1 m),中上方是一个 5  $\Omega$ ·m 的低阻块(3 m \* 1.4 m),中下方 5  $\Omega$ ·m 低阻块(4.5 m \* 3.2 m),右边 是一个 6.5 m \* 4 m 的高阻块(300  $\Omega$ ·m),背景电



Fig. 2 Diagram for resistivity model #1 and #2 (a)模型 #1;(b)模型 #2

阻率 100 Ω・m。模型 #2 设置了 6 个(2 m \* 2 m)、 水平方向等间距的低阻块(10 Ω・m),竖直方向上 相邻模型块中点深度以 0.5 m 为间距依次增加<sup>[5]</sup>。 以上两个模型均采用 41 根电极,最小电极距 1 m。 2.2 噪声模拟

电极位置误差和观测电位误差是影响直流电法 数据质量的两个关键因素<sup>[3]</sup>。电网传输,仪器供电 不稳定的影响是造成大的电位误差的主要来源。在 野外作业过程中,电缆局部损坏、电极接触不良、仪 器操作不当,高压电线、电缆的交流传输都会造成电 位误差,所以电位误差有随机性和不可预估性。实 际的装置分辨能力和勘探深度依赖于地电模型的电 性特征、异常体形态和噪声水平。为了研究不同水 平电位噪声对反演模型分辨率、勘探深度的影响,对 比无噪声反演模型,给出不同水平电位噪声对反演 结果的影响评估。通过数值分析,发现不同的观测 电位误差在不同位置随着电位值的降低,电位误差 呈幂函数增加<sup>[3]</sup>,即:

 $β = (c_1/U)^{c_2}$ (1) 其中:β表示观测电位相对误差的绝对值,为了实现 电位误差和测量电位值相关性可视化,将电位值 U 设置为对数(通过视电阻率求得),单位 mV; $c_1$ 、 $c_2$ 是常数。该函数表示野外数据采集过程中所产生的 随机电位噪声。为了客观反映不同水平误差特性分 布规律,模拟的噪声电位公式如式(2)所示<sup>[5]</sup>:

 $U_{noise} = U(1 + R * \beta/100)$  (2) 式中:R表示随机数,取值在-0.5到0.5之间;在 文中指定 $c_1 = 5 * 10^5$ , $c_2 = 0.25$ ,以便获得不同噪声 水平的视电阻率数据; $U_{noise}$ 表示模拟噪声电位值;U表示无噪声电位值。将5%、10%、15%三种水平电 位噪声加到无噪声数据(#1模型的偶极#6装置数



 3 三种水平(5%,10%,15%)模拟电位噪声以及噪声和无噪声视电阻率相关图
 Fig. 3 Simulations of the potential noise and noisy vs noisy free apparent resistivity correlation diagram for three levels of noise (from top to bottom: 5%, 10%, 15%)
 (a)、(c)、(e)模拟电位噪声; (b)、(d)、(f)噪声和无噪声视电阻率比

据)中,得到相同电位条件下不同水平噪声分布和视 电阻率对比,该模拟噪声水平是按照最小观测电位 值的占比来确定的。图3中反应出不同水平噪声的 视电阻率相对于无噪声视电阻率的变化规律,噪声 越小,视电阻率的相关性越高,就能够更加真实地反 映地下介质分布情况;相反,噪声越大,视电阻率相 关性越差,反演模型电阻率越偏离真实电阻率,进而 影响勘探效果和解释质量。

### 3 模型分辨率与勘探深度

反演是地球物理的核心问题,其主要目的是根 据地面上探测到的观测信号,推测地球内部与信号 反演参数均保持一致,初始阻尼因子和最小阻尼因 子分别为 0.15 和 0.03,运用高斯一牛顿迭代法计 算 3 次~5 次,约束均方根误差 RMS,控制其精度。 主要通过对比不同模拟噪声水平的地电模型分辨 率,来评估反演结果的可靠性。利用模型分辨率矩 阵 R 来量化模型分辨率,矩阵 R 来源于约束最小二 乘等式<sup>[11]</sup>:

$$(\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J} + \lambda \boldsymbol{F}) \Delta \boldsymbol{m} = \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{g} - \lambda \boldsymbol{F}_{m}$$
(3)

其中:J是雅各比矩阵;λ是阻尼因子;F是约束矩 阵;Δm是模型参数修改向量;g是数据残差向量。 模型分辨率矩阵 R 在反演过程中用来分辨地下电 阻率:

$$\boldsymbol{R} = (\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J} + \lambda \boldsymbol{F})^{-1}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}$$
(4)

反演模型电阻率通过该矩阵线性逼近真实电阻 率<sup>[12]</sup>:

$$\rho_{inv} = \mathbf{R} \rho_{true} \tag{5}$$

分辨率矩阵 R 主对角线上的元素表示分辨反 演模型电阻率程度,在理想情况下,对角线元素等于 "1",非对角线元素等于"0",此时矩阵 R 表示最佳 分辨率。分辨率矩阵的对角元素可以定量的对比不 同装置的分辨能力。在实际探测过程中,现场情况 较为复杂,各水平电位噪声会不同程度影响地电模 型分辨率,导致采集数据不能真实地反映地下构造 情况。

在直流电法中,各装置的勘探深度作为评估野 外实际数据的探测深度的指数,是对能够更深层地 识别电阻能力的量化,即利用装置的灵敏度函数得 到一系列勘探深度值。该指数客观地反应出一种装 置所能探测的深度范围。值得注意的是,不同装置 的勘探深度不仅对均匀地电模型有参考价值,而且 对指导野外特定目标体勘探有重要意义。Oldenburg<sup>[13]</sup>研究出一种评估勘探深度的方法,运用不同 的约束执行两次反演,公式为式(6)。

 $(J^{T}J + \lambda F) \Delta m_{k} = J^{T}R_{d}g - \lambda F(m_{k} - m_{0})$  (6) 其中: $m_{0}$ 是均匀半空间参考模型; $\Delta m_{k}$ 是模型参数 修改向量;J是雅各比矩阵; $\lambda$ 是阻尼因子;F是约束 矩阵;g是数据残差向量。第二个参考模型电阻率 大约是第一个参考模型的 10 倍到 100 倍。计算勘 探深度公式为式(7)。

$$H(x,z) = \frac{m_1(x,z) - m_2(x,z)}{m_{1r} - m_{2r}}$$
(7)

其中:m<sub>1</sub>,和m<sub>2</sub>,表示两个参考模型电阻率;m<sub>1</sub>和m<sub>2</sub> 表示两次反演获得的模型电阻率。当两次反演得到 同样的模型电阻率时,H将接近"0",表示此时模型 电阻率能够被很好地识别;当反演模型电阻率和参 考模型一致时,H接近"1",表示模型电阻率不能够 被识别。因此,小勘探深度值表示得到的反演模型 电阻率是可靠的,大勘探深度值则是不可靠的。一 般将以往科研工作者给出的平均勘探深度扩大三到 五倍左右,以包含模型最底层的电阻率信息,理论上 来讲,此时的勘探深度为"1"。以防模型底层深度不 是足够大,将勘探深度值标准化,公式如式(8)所 示<sup>[10]</sup>。

$$H_n = \frac{H}{H_{\text{max}}} \tag{8}$$

式中:*H*<sub>max</sub>是公式(7)计算得到的最大勘探深度值。 这样处理过后,就将不同的勘探深度值归一化进行 比较。

# 4 结果对比分析

#### 4.1 反演结果对比分析

图 4 呈现了四种装置在四种噪声水平下模型 ♯ 1 的反演结果。温纳装置数据得到的反演模型左侧 和中上部低阻块基本收敛,异常形态与目标体基本 吻合(图 4(a))。中下部较大低阻块无法探测到,右 侧的高阻异常体收敛效果相对较差,反演获得高阻 异常深度比实际模型深度浅,与肖宏跃<sup>[5]</sup>得出的结 论一致。对比温纳装置不同噪声水平的反演模型, 无噪声反演成像异常最为显著,电性界面最为清晰, 基于温纳装置纵向分辨率的优势,中部上下两个低 阻异常体电性界面较三极装置和偶极装置清晰,而 且中下部低阻块也有小部分异常出现。随着噪声水 平的增大,各目标体的反演异常清晰度逐渐下降,尤 其中上部低阻异常和右侧高阻异常下降最为明显。 三极装置在不同噪声水平下,异常变化甚微,除了无 噪声高阻异常较为明显,各异常体电性界面清晰度



图 4 四种噪声水平模型 #1 数据反演结果 Fig. 4 Result of the inversion of model #1 data sets for four levels of noise

(a)温纳 # 6 装置;(b)三极 # 6 装置;(c)偶极 # 6 装置;(d)温施 # 6 装置

相差无几。

偶极装置反演异常特点和三极装置相似(图 4 (c)),左侧低阻块旁边和右侧高阻块旁都有假异常 出现。对中部上下高低阻块电性界面的分辨程度较 优于三极装置。温施装置反演成像特点与温纳装置 相似,纵向分辨率强于偶极和三极装置。图 4(d), 中上部低阻块异常明显,电性界面收敛较好。左侧 低阻块和右侧高阻块异常界面清晰度有所下降。无 噪声条件下,对高阻异常灵敏,但是在 5%噪声水平 下,右侧高阻和中下部低阻块异常明显降低,电性界 面变得模糊。依次增大噪声水平,异常清晰度整体 降低。

### 4.2 模型分辨率对比分析

观测数据的质量和不同水平噪声的影响都会导

致分辨率的降低。前者可以通过提高仪器精度,运 用更好的采集技术取得高质量的观测数据。噪声的 影响本身有其随机性,所以从这一层面上研究噪声 对反演成像结果的影响对提高解释精度有重要作 用。不同装置对地电模型的分辨率由浅到深依次减 小。针对于不同装置的地电模型分辨率,要考量各 装置的电极距、隔离系数、模型结展布以及噪声影响 等因素。四种装置在不同水平噪声条件下的模型分 辨率通过反演进行了量化,量化后的分辨率范围是 "0"到"1"(无量纲)。以往科研工作者将 0.05 作为 装置模型分辨率的下限阀值。总体来看,不同水平 噪声对浅层地电模型的分辨能力影响较小,影响较 大的区域主要集中在对地电模型有效分辨范围内的 底层。噪声水平的增大对模型分辨率的影响较弱,





分辨率降低幅度很小。在一定深度处,5%噪声条件 下模型分辨率相对于与无噪声条件分辨率下降程度 较大。不同装置对地电模型的分辨能力受噪声影响 程度也不尽相同,温纳和温施装置的模型分辨率下 降程度小于偶极和三极装置。图5显示了有效分辨 率的深度处,不同装置的模型分辨率在噪声条件下 的变化规律。相同有效分辨深度处,温纳装置的模 型分辨率降低 42.5%左右,三极装置降低 52%左 右,偶极装置的降低范围在 62.5%左右,温施装置 降低 41.2%。由此可见,偶极装置的模型分辨率受 噪声影响最大,温纳装置受噪声影响最小。

考虑到 5%以上噪声水平对模型分辨率影响较 小,研究了在无噪声和 10%两种水平噪声下同一种 装置随电极极距的增大模型分辨率的变化规律。图 6 和图 7 为四种装置在无噪声和 10%噪声水平下 mod # 2 的模型分辨率对比。无噪声条件温纳装置

♯1到♯6装置所体现的模型分辨率结果除了深度 有所增加,总体上差异不大,10%噪声水平的模型分 辨率在同样深度处较无噪声分辨率略低。三极装置 是10%噪声水平下,相同深度处与无噪声模型分辨 率相差较大,尤其三极 ♯1 的分辨率下降最为显著, 而且随着 ♯1 到 ♯7 装置的增加(供电极距增大),分 辨率降低程度逐渐减小。三极装置在噪声条件下的 模型分辨率降低幅度相比温纳装置大的多,而相对 于偶极装置则降低幅度略小。在依次增大供电极 距,偶极和温施装置的模型分辨率在10%噪声水平 下得到的模型分辨率在一定深度范围内明显降低, 最显著的是偶极 ♯1 装置和温施 ♯1 装置。较小电 极距的装置具有较大的装置系数,增大电极极距的 过程中,装置系数减小,受噪声的影响程度就会大幅 降低,偶极和三极装置的模型分辨率变化很好的说 明了这一点,与Loke<sup>[10]</sup>得出的装置系数越大受噪



图 6 温纳和三极装置的 # 2 模型分辨率图像

Fig. 6 Images of the #2 model resolution for Wenner and Pole-Dipole configurations data sets obtained from noise free and 10% level of noise
(a)温纳装置无噪声数据;(b)温纳装置 10%噪声数据;
(c)三极装置无噪声数据;(d)三极装置 10%噪声数据

声影响越大的结论向一致。电极距在依次增大过程 中,温纳装置的模型分辨率受噪声影响的变化幅度 最小,偶极装置变化幅度最大,三极和温施装置介于 中间。

4.3 对比勘探深度

图 8 和图 9 反应了四种装置在四种噪声水平下 的标准化勘探深度分布。设置 0.1 作为装置有效勘 探深度的上限阀值,为了更清晰的对比各装置勘探 深度值,颜色比例卡用粉红色表示。在相同的观测 条件下,温纳装置勘探深度是 10 m,在5%以上噪声 条件下约 7.6 m,勘探深度降低 24%,图 8(a),噪声 条件下左侧和右侧勘探深度为 6.5 m 左右。三极 装置勘探深度是 19.2 m,5%以上噪声条件下约 13 m,下降约 32%;在无噪声条件下较大,最浅为 5 m, 最深能达到 19 m 以上(图 8(b)),而在噪声条件下, 勘探深度变化在 10 m~13 m 浮动,其它三种装置 都无此类情况,可能与三极装置的不对称性有关。 偶极装置勘探深度为 11.5 m,5%以上噪声条件下 为 7.4 m,降低 35%以上(图 9(a))。

温施装置勘探深度为 11.5 m,5% 噪声条件下



Fig. 7 Images of the #2 model resolution for Dipole-Dipole and Wenner-schlumberger configurations data sets obtained from noise free and 10% level of noise
(a)偶极装置无噪声数据;(b)偶极装置 10%噪声数据;
(c)温施装置无噪声数据;(d)温施装置 10%噪声数据

为 8.6 m,降低 25%。值得注意的是,10%和 15% 噪声水平对装置勘探深度的影响和 5%噪声水平的 基本一致,只是能够达到相同勘探深度的数据点有 所减少。不论有噪声无噪声,不同装置在浅层区域 总存在高的勘探深度值,表现为圆圈形状,其原因主 要和模型高低阻分布有关,mod # 2 模型中部是一 系列高阻块,供电电流在低阻背景下流入,遇到高阻 会限制电流流向更深的区域。另外左侧和右侧都会 出现高的勘探深度值,这和高密度数据点的分布有 关,两边数据点要少于中间区域。

综合对比,噪声水平在 5% 以上增大对装置勘 探深度的影响较弱,降低幅度很小。在测线长度、电 极个数、电极距、隔离系数、地形起伏状况等观测条件一致情下,三极、偶极装置的勘探深度受噪声影响 规律较一致,在分辨能力要求范围内,受影响最小的 是温纳装置;受影响最大的是偶极装置;温施装置勘 探深度受噪声影响程度和温纳装置相似,只是相同 观测条件下勘探深度略大。

### 5 结**束**语

1)随着噪声水平的增大,目标体的反演异常逐 渐降低,四种装置异常下降幅度不同,下降最为显著 的是温施装置。温纳装置无噪声条件的反演成像异 常最为显著,电性界面最为清晰。在5%以上噪声



图 8 不同噪声水平温纳和三极 # 4 装置的标准化勘探深度图像 Fig. 8 Images of normalized depth of investigation for the # 4 Wenner and Pole—Dipole array configurations from four levels of noise (a) 温纳 # 4 装置;(b) 三极 # 4 装置

水平下,四种装置反演模型电性界面清晰度均有所 降低。依次增大噪声水平,异常整体降低。

2)在不同噪声水平下各装置对浅层地电模型的 分辨率影响甚微,但对深层地电模型分辨率影响较 大,尤其对偶极和三极装置深层模型分辨率的影响。 有效分辨地电模型的深度范围内,温纳和温施装置 在5%以上噪声条件下的模型分辨率降低2/5,三极 装置降低一半,偶极装置降低3/5左右。最大探测 深度处,偶极装置的模型分辨率受噪声影响最大,而 温纳装置受噪声影响最小。增大电极极距,可以有 效减小电位噪声对地电模型分辨率的影响。

3)噪声会影响各装置的勘探深度,使能够有效 分辨地电模型的勘探深度变浅。四种装置在相同观 测条件下,勘探深度在电位噪声影响小均有所减小。 三极、偶极装置的勘探深度受噪声影响规律较一致, 在分辨率要求范围内,勘探深度降低约三分之一。 受影响最小的是温纳装置,勘探深度降低约四分之 一,受影响最大的是偶极装置。

### 参考文献:

- [1] DAHLIN T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications [M]. First Break, 1996.
- [2] 杨天春,许德根,张启,等. 高密度电法在隐伏溶洞勘 探中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2016,27
   (2):145-148.
   YANG T C,XU D G,ZHANG Q, et al. Application of

high density resistivity method in engineering karst exploration[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(2):145-148. (In Chinese)

- ZHOU B.DAHLIN T. Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying
   [M]. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization. John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [4] LABRECQUE D, MILETTO M, DAILY W, et al. The effects of "Occam" inversion of resistivity tomography data[J]. Geophysics, 1996, 61(2):538-548.





- [5] MARTORANA R, CAPIZZI P, DAlessandro A, et al. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016,137:34-48.
- [6] SZALAI S, KOPPáN A, SZOKOLI K, et al. Geoelectric imaging properties of traditional arrays and of the optimized Stummer configuration[J]. Near Surface Geophysics, 2013, 11(1):51-62.
- [7] 晏月平.高密度电法单一偶极装置勘探深度探讨[C].
   全国地质勘察与矿山地质学术研讨会,2004:243-248.

YAN Y P. Discussion on depth of investigation of high density resistivity method pole — dipole configuration [C]. National Symposium on Geology and Mining Geological Survey,2004:243-248. (In Chinese)

[8] 肖宏跃,武娇阳,雷宛,等. 实验室高密度电法微测系
 统的模型研究[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(4):
 1464-1472.
 XIAO H Y, WU J Y, LEI W, et al. The study on

model in laboratory of high density micro-electrode measurement system [J]. Progress in Geophysics, 2011,26(4):1464-1472. (In Chinese)

[9] 田玉民,史殿胜. 一种加大探测深度的高密度电法测 量装置及应用[J]. 工程地球物理学报,2008,5(6): 701-704.

TIAN Y M, SHI D S. On high — density resistivity system in the investigation of deeper structure [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5 (6):701-704. (In Chinese)

- [10] LOKE H M. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imiging surveys[M]. Elucidation of abiotic stress signaling in plants. Springer New York, 2001.
- [11] DAY-LEWIS F D, SINGHA K, BINLEY A M. Applying petrophysical models to radar travel time and electrical resistivity tomograms: resolution dependent limitations[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 2005, 110(B8):1-17.
- [12] MENKE W. Review of the generalized least squares

method[J]. Surveys in Geophysics, 2015, 36(1):1-25.

[13] OLDENBURG D W, LI Y. Estimating depth of inves-

tigation in DC resistivity and IP surveys[J]. Geophysics, 1999, 64(64):403-416.

### The study on ERT resolution and depth of investigation based on different levels of noise

XING Runlin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Rujun<sup>1,2,3</sup>, LIU Haifei<sup>1,2</sup>, WANG Xiaojie<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xingsheng<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Nonferrous Resources and Geological Hazard Detection of Hunan Province,

Central South University, Changsha 410083, China;

3. Champion Geophysical Technology Ltd, Changsha 410082, China)

Abstract: Potential noise is a key factor that affects the quality of ERT data acquisition and then affects the reliability of the inversion imaging interpretation. Inversion resistivity model differences of four kinds of configurations(Wenner, pole-dipole, dipole-dipole, Wenner-Schlumberger) are comparatively analyzed by simulating four different levels of potential noise and then obtain noisy data sets in this paper. Moreover, the effect of each configuration on the sensitivity of noise response and the effect of different levels of noise to the four configurations' inversion model resolution and depth of investigation are evaluated. In addition, we quantified the inversion model resolution and the depth of investigation of each configuration, quantitative analysis the transformation law of each levels of noise to inversion model resolution and depth of investigation of different configurations. And comprehensively evaluate the influence of the four configurations' inversion model resolution and depth of investigation of different levels of noise. The final conclusions; the sensitivity degree of dipole-dipole and pole-dipole configurations to each noise level is higher, while the Wenner and Wenner - Schlumberger configurations is lower. Noise has a great impact on the deep geo-electric model resolution in the depth range of resolving the geo-electric model effectively. The model resolution of Wenner and Wenner-schlumberger configuration is reduced by 2/5, pole-dipole configuration half and dipole-dipole configuration 3/5. The depth of investigation, to some extent, decreases for four configurations under the influence of noise. Wenner and Wenner-schlumberger configurations' are reduced by about 1/4, while pole-dipole configuration and dipole-dipole configurations by about 1/3.

Keywords: potential noise; least-squares inversion; resolution; depth of investigation