

和平地电台深孔地电阻率异常的数值模拟研究*

严兴^{1,2}, 邓志辉², 刘吉平²

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 广东省地震局, 广东 广州 510070)

摘要: 对近两年河源发生的几次地震的地电阻率测值资料进行分析, 发现和平地电台的深孔地电阻率测值不同于大多数观测台地电阻率的异常变化, 表现为正常时期长趋势下降, 地震前转平或上升。对此情况进行了探讨, 认为是电极极化及震前导电离子上涌所致; 在此基础上建立了有限元模型, 并采用数值模拟的方法对此进行印证。

关键词: 深孔地电阻率; 有限元数值模拟; 和平地电台

中图分类号: P319

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)04-0623-06

0 引言

现今国内的地电阻率观测通常采用地表布极方式, 电流集中在表层, 因此地表因素(如季节, 降雨, 地表水位及人为等)变化都会对观测值产生影响(钱家栋等, 1985; 杜学彬, 2010)。深孔地电阻率观测近似全空间, 可以有效的消除地表环境变化对深孔测道的影响, 并且对地下基岩电阻率的变化有较灵敏的响应, 从而提高了观测值的可信度。广东省河源市和平地电台同时开展了地表布极和深孔布极地电阻率的观测, 深孔布极观测在消除地表干扰, 季节天气变化影响等方面表现良好(刘昌谋等, 1994), 并且在近两年的几次地震中出现出明显的异常。不过和平地电台深孔地电阻率显示出的异常却与通常认为的地震前出现低值异常不一致, 表现为平时趋势性下降, 地震前转平或上升。本文将通过数值模拟的方法对这一测量结果的原因进行分析探讨。

形较平缓开阔, 相对高差不大。测区东南角是由侏罗系兰塘群砂页岩组成的低丘台地, 地势较缓, 多数有植被或耕地; 西南东江边一带为亚砂土和砂土组成的阶地, 属第四系河流冲积地; 其他广泛分布的是由上白垩统地层砂砾岩组成的红岩低丘台地, 海拔 70 m, 最高 123.6 m, 高处基岩多裸露, 局部由于风化剥蚀, 已削为平地或坳谷。电极距离西侧, 西南侧东江岸边均超过 500 m。



图1 和平地电台地理位置图

Fig. 1 The location map of Heping Geoelectric Station

1 台站概况

1.1 和平地电台基本概况

和平地电台位于广东省河源市源城区和平村, 位于新丰江水库区东南, 大坝以东约 6 km 处(图 1), 河源盆地北东侧, 在河源断裂以东约 4 km 处。距离 1962 年河源 6.1 级地震震中约 6 km。该台址地

1.2 深孔地电阻率观测

和平地电台观测采用四极对称布设方式, 布设了三道测线(图 2)。东西向 $N80^{\circ}W$ 为深孔短测道, 布设于台站院内, AB: 54 m、MN: 18 m、电极埋深 63 ~ 65 m。供电极及测量极采用 3 mm

* 收稿日期: 2014-09-16.

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2013B020200010)资助.

铅板卷成长 600 mm, 直径为 60 ~ 75 mm 实心圆筒状电极。外线路为架空方式, 采用 3 mm 铜包钢线架设; 观测仪器为广东省地震局研发的 C-ATS 数字地电仪。自 1992 年 8 月开始记录, 在当地发生的两次中强地震前地电阻率都曾出现过上升转平的变化 (广东省地震局, 2005)。

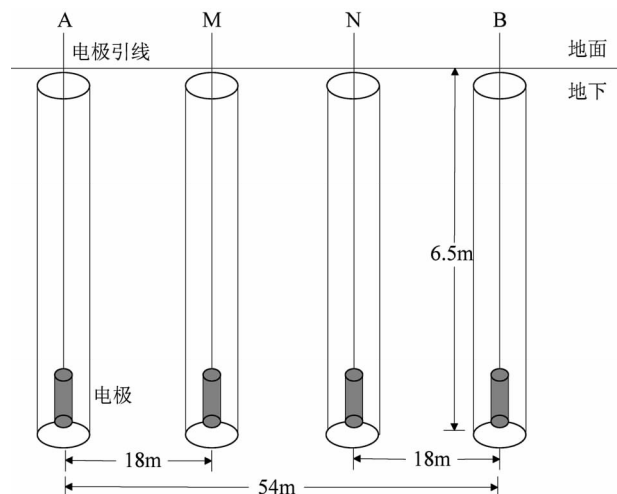


图 2 和平地电台深孔电阻率布极图

Fig. 2 The electrode layout of the deep-hole resistivity of Heping Geoelectric Station

2 地电阻率异常

2011 年期间, 和平地电台地电阻率测值从缓慢的趋势性下降转为趋势性上升, 到 2012 年初开始呈现加速上升, 上升幅度约 3%, 2012 年 1 月中旬开始平稳, 2012 年 2 月 16 日河源市东源县发生 $M_s 4.8$ 地震; 地震后测值继续呈现缓慢震荡下降态势, 5 月开始加速下降, 5 月 29 日起趋于平稳。5 月共下降 $1.89 \Omega \cdot m$, 下降幅度 6.72%, 随后呈现震荡平稳上升, 2012 年 8 月 31 日河源市源城区、东源县交界发生 $M_s 4.2$ 地震; 至 2012-12-19 ~ 2013-01-07 日地电阻率测值加速上升 $0.39 \Omega \cdot m$, 上升幅度 1.5%, 之后保持平稳震荡, 2013 年 2 月 22 日河源东源县发生 $M_s 4.8$ 地震。这几次河源地震, 和平地电台地电阻率表现为长趋势下降, 在震前转平或异常升高 (图 3)。而国内其他一些地电台站在典型地震来临前表现出地电阻率值加速下降, 在低值附近发生地震, 随后地电阻率恢复到正常水平的过程。如唐山地震前的宝坻台、昌黎台, 松潘地震前的武都台 (钱复业等, 1982, 1990; 钱家栋, 曹爱民, 1998)。

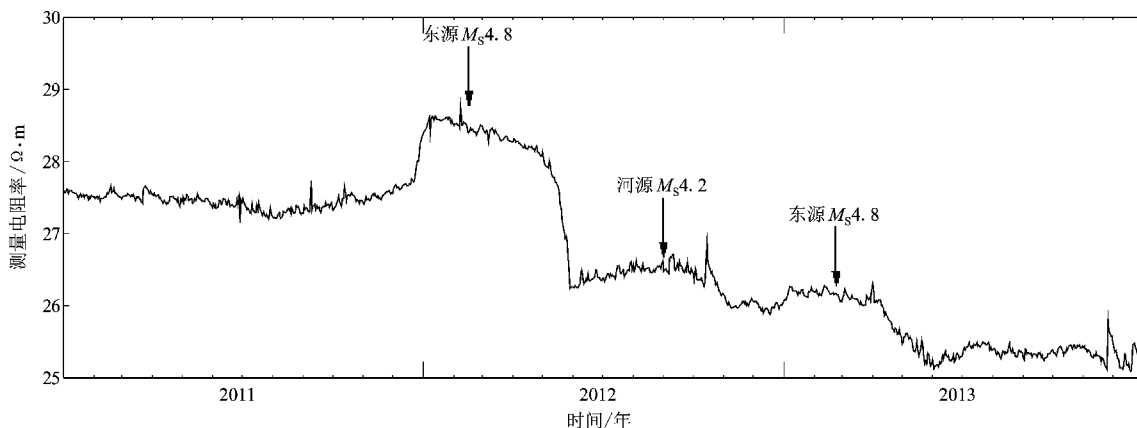


图 3 和平地电台地电阻率异常曲线

Fig. 3 Resistivity anomaly before the Heyuan earthquakes observed at Heping Geoelectric Station

3 观测结果分析

经查阅资料及实地考察, 在中国北方地区布设的地电阻率通常为浅表电极, 电极埋深一般为几米, 而其第四纪覆盖层多厚达 60 m 以上, 地下水埋深也在 40 m 左右, 地下水分布均匀, 无大的地下径流, 电极埋在土层中, 不存在电极极化现

象; 而广东地处南方多雨地区, 地下水复杂丰富, 通常地表下挖几米就是地下水, 在该地区采用地表布极方式易受降雨、地表水的影响, 所以考虑采用深井布极的方式, 一方面滤除了地表的各种干扰, 但是同时带来一个问题, 电极泡在水中, 会有电极极化现象, 长期观测会使电极内阻抗越来越大, 即供电极周围电阻率不断增大。这可能是观测视电阻率长趋势不断下降的原因。

另外我们注意到，和平地电台附近 5 km 的黄子洞水氡观测点在几次地震前，都出现了高值突跳的异常过程（图 4），说明深层的粒子在应力应变的调整过程中上升到了表层；由此我们设想地震前地下的岩石变形可能使深部高导电性粒子进入电阻率观测井中，使电极周边的电阻率减小。这可能造成地震前观测视电阻率转平或呈现

上升趋势。

此外，带有高导电性粒子的地下流体的影响范围并不能确定，有可能是局部的，比如局限在电极附近，也有可能是整体性的，在测区的地下呈现整体上升态势。

因此笔者采用有限元数值模拟的方式，对这几种情况分别建模和计算。

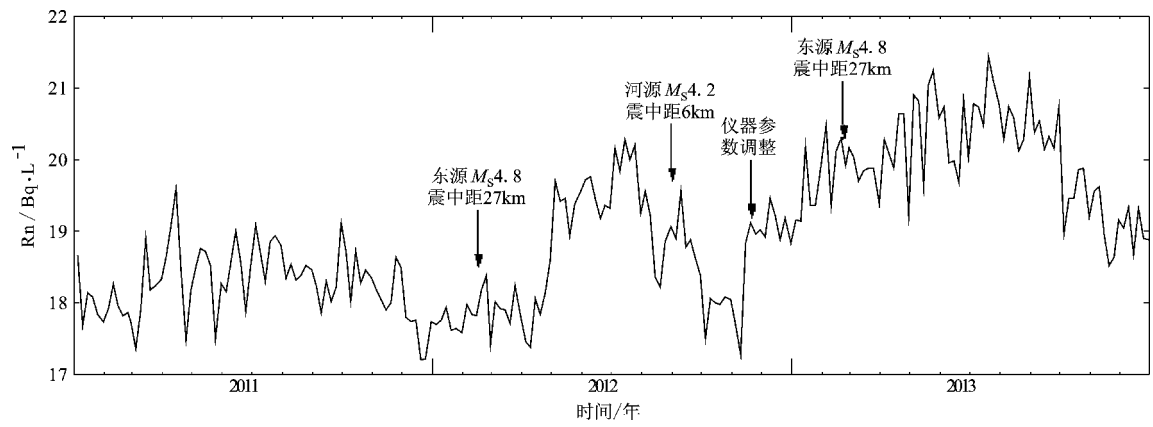


图 4 河源地震前黄子洞水氡五日值曲线异常

Fig. 4 Anomaly in 5-day-value curve of water radon at Huangzidong Station before Heyuan earthquakes

4 有限元数值分析

为了进一步验证供电极附近电阻率的变化对视电阻率观测值的影响，我们利用有限元分析软件 ANSYS 建立三维有限元模型，分别计算了 3 种情况下真电阻率的变化对视电阻率的影响。

4.1 建立有限元模型

根据测区的电阻率测深曲线，结合计算误差估计（解韬等，2013a, b），模型厚度设置为 1 515 m，模型长宽都设置为 2 000 m（图 5）。根据测区的电性结构（表 1），模型共设置 4 层，第 1 层厚度 5 m，为表层干燥土，电阻率设置为 200 Ω·m；第 2 层厚度 10 m，为表层湿润土，电阻率设置为 150 Ω·m；第 3 层厚度 500 m，为红层基岩，电阻率设置为 50 Ω·m；第 4 层厚度 1 000 m，为变质岩，电阻率

设置为 150 Ω·m。有限元的网格划分直接关系到计算精度及时间花费，因此我们在中心测区（700 m × 700 m）进行了网格的适当加密，其他周边区域网格划分较稀疏以减少时间花费。

可将整个模型看做稳恒电流场。在选定的两个供电极（极距 54 m，埋深 65 m），即结点 A，B 上分别输入电流 +2 A 和 -2 A，表示电流从 A 端流入 B 端流出。从计算结果中查看 M，N 结点的电位差 ΔV_{MN} ，根据电阻率计算公式 $\rho = K \cdot \frac{\Delta V_{MN}}{I}$ 即可计算视电阻率（这里 $K = \pi \frac{AM \times AN}{MN}$ ）。在该计算模型中，先将两个电极周围的单元进行了加密网格划分，进一步提高计算精度，然后各选取了 200 个单元进行电阻率值改变的试验。选取单元集合的垂向直径约 0.11 m，与井孔直径相同。

表 1 测区电性结构数据表

Tab. 1 The data sheet of electrical structure in measurement area

测点	第 1、2 层（表土）		第 3 层（红层基岩）		第 4 层（变质岩）		拟合误差 (%)
	厚度/m	电阻率/Ω·m	厚度/m	电阻率/Ω·m	厚度/m	电阻率/Ω·m	
一号（黄竹坑）	5.6	60 ~ 78	587	38 ~ 65	前 3 层以下	130	2.22
二号（石下）	11.2	150 ~ 240	580	43 ~ 75	前 3 层以下	160	2.25
三号（下山）	17.4	113 ~ 262	580	42 ~ 73	前 3 层以下	90 ~ 192	2.75

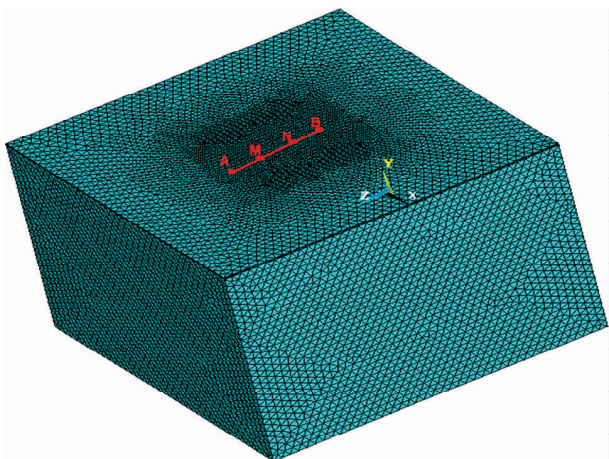


图5 地电阻率有限元模型

Fig. 5 Finite element model of deep-hole resistivity

4.2 计算过程设计

(1) 不断增大供电极附近选取的单元集合的电阻率, 模拟电极极化现象, 观察测量极计算出的视电阻率变化。

(2) 不断减小供电极附近选取的单元集合的电阻率, 模拟导电粒子进入井水的影响, 观察测量极计算出的视电阻率变化情况。

(3) 假设下部含水岩石层电阻率较低 (设置为 $10 \Omega \cdot \text{m}$), 将水位在整个模型范围内的水平面不断提高, 模拟地下低阻高导流体在震前不断上升对电阻率观测值变化的影响。

5 计算结果

随着电极附近电阻率的不断增大, 测量电阻率呈不断下降的趋势, 变化率达到了 5%, 如图 6 所示。说明泡在水中的电极的不断极化, 内阻抗的增高的确会造成电阻率值的趋势性下降。

随着电极附近电阻率的不断减小, 测量电阻率呈不断上升的趋势, 变化率超过了 10%, 如图 7 所示。这说明电极周围导电离子不断聚集增多, 导致局部导电性增强, 电阻率降低, 会使测量极

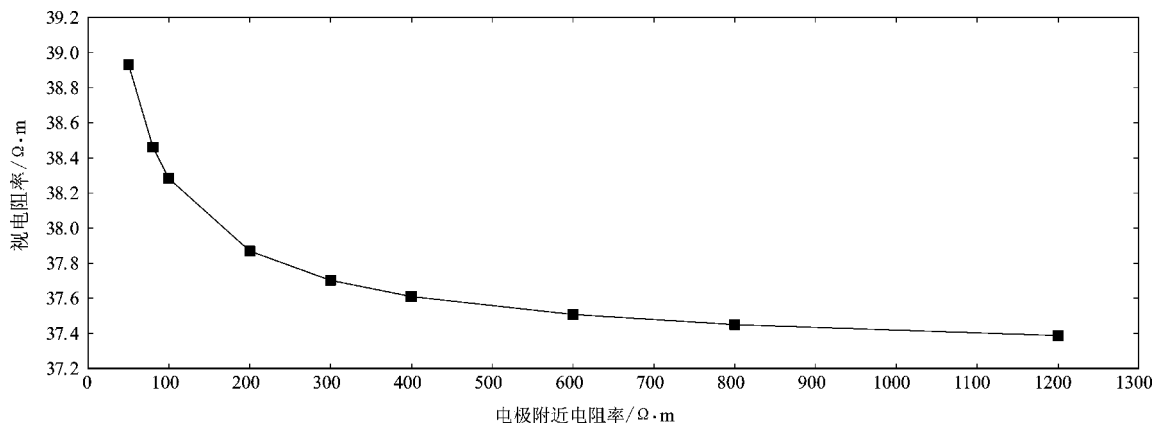


图6 视电阻率随电极极化的变化曲线

Fig. 6 Apparent resistivity curve varied with the electrode polarization

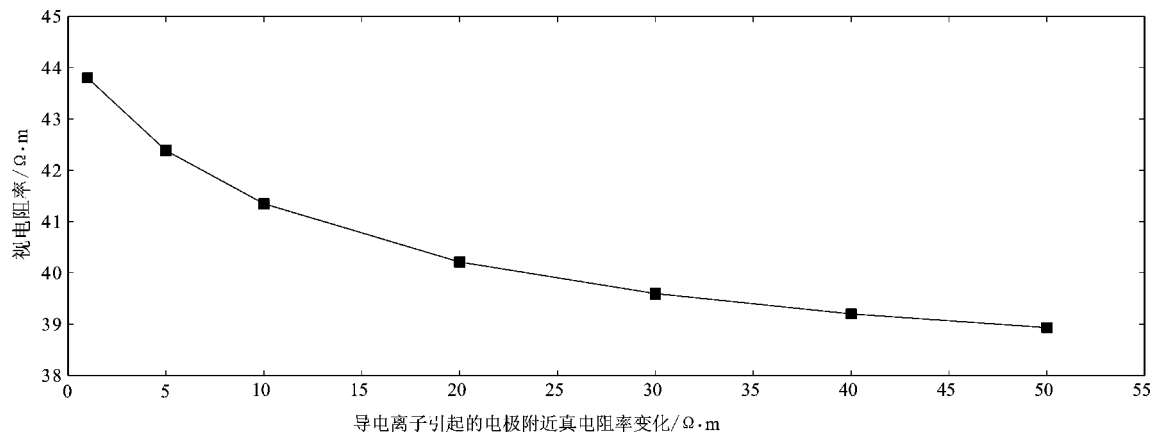


图7 视电阻率随导电离子浓度改变的变化曲线

Fig. 7 Curve of apparent resistivity varied with the concentration changing of conductive particles

得到的视电阻率呈上升的趋势。

如果地震前的地壳深部运动导致地下高导流体的整体上升,可能会影响整个测区的地下电性结构,第三步的模拟针对这种情况,将整个测区

低阻的部分范围不断抬升,模拟高导流体界面的上升,发现随高度的上升,测量电阻率呈不断下降的态势,在界面接近电极所在的高度时,测量值会出现急剧下降(图8)。

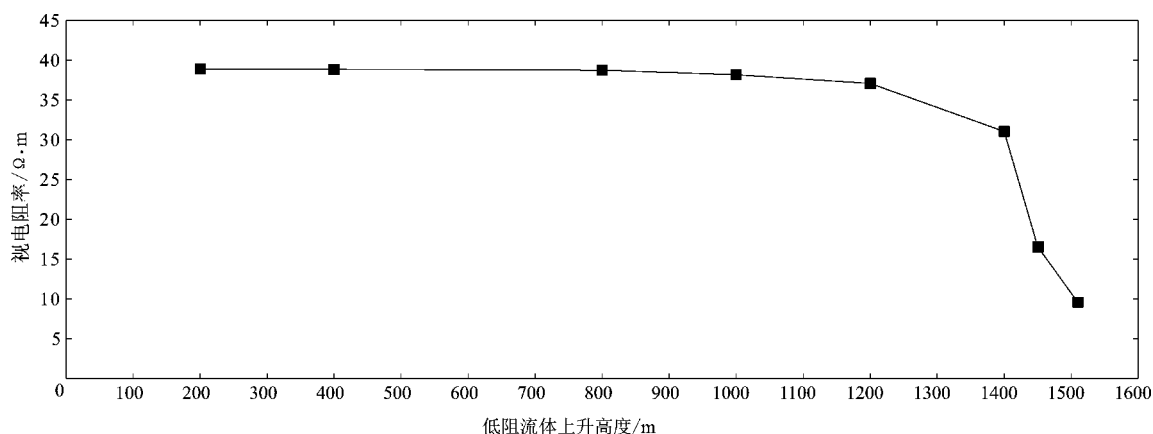


图8 视电阻率随地下低阻流体上升的变化曲线

Fig. 8 Curve of apparent resistivity varied with the rising of high-conductivity fluid

6 结论与讨论

泡在井水内供电电极的极化将导致供电电极附近分压增大,观测极电压差降低从而测量电阻率减小。这与和平地电台的观测结果一致。

地震前深部带电粒子进入井水中将导致供电电极附近电阻率减小,从而供电电极附近分压减小、观测极电压差升高,导致测量电阻率增大。这可能是和平地电台在地震前出现视电阻率异常增大的原因。

对于水位埋深较大的地区,地下高导流体相当于一个并联的低阻体,直接影响整个测区的视电阻率。地下高导流体水位升高代表并联部分增大,可以导致视电阻率减小;地下水位降低代表并联部分减少,将导致视电阻率增大。导电粒子同水位变化的共同影响是造成震前电阻率转平或异常升高的可能原因。

河源地区震情平静时期,和平地电台深孔地电阻率测量应该主要记录到的是电极的极化作用,而在临震前,深部导电粒子同地下水位变化的共同作用是造成电阻率测值转平或异常升高的主要原因。

应用有限元数值模拟方法能够定量的计算出各项干扰因素对测量值的影响,不过本模型采用

的电性结构都是取水平状,影响因素也都是作用于整体或局部的小区域。今后的工作中还需进一步计算低阻或高阻异常体分布在不同的位置和范围时对观测值的影响(杜学彬等,2007),以及电极埋深不同对干扰因素的响应幅度,以更好地解释地电阻率测值的复杂变化。

参考文献:

- 杜学彬,李宁,叶青,等. 2007. 强地震附近视电阻率各项异性变化的原因[J]. 地球物理学报, 50(6): 1802-1810.
- 杜学彬. 2010. 地震预报中的两类视电阻率变化[J]. 中国科学(D辑), 40(10): 1321-1330.
- 广东省地震局. 2005. 广东省地震监测志[M]. 北京:地震出版社, 70-78.
- 解滔,李飞,沈红会,等. 2013a. 新沂地震台地电阻率反向年变分析[J]. 地震学报, 35(6): 856-864.
- 解滔,卢军,李美,等. 2013b. 地理钢缆对宝昌台地电阻率干扰的定量分析[J]. 地球物理学进展, 28(2): 727-734.
- 刘昌谋,桂燮泰,柴剑勇,等. 1994. 河源地电台全空间地电阻率试验[J]. 华南地震, 14(3): 40-45.
- 钱复业,赵玉林,刘捷,等. 1990. 唐山7.8级地震地电阻率临震功率谱异常[J]. 地震, (3): 33-38.
- 钱复业,赵玉林,于谋明,等. 1982. 地震前地电阻率的异常变化[J]. 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[J]. 地震, 18(S1): 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[M]. 北京:地震出版社: 103-107, 187-225.

Research on Numerical Simulation of Deep-hole Geoelectric Resistivity Anomaly in Heping Geoelectric Station

YAN Xing^{1,2}, DENG Zhi-hui^{1,2}, LIU Ji-ping²

(1. *Institute of Geology, CEA, Beijing 100029, China*)

(2. *Earthquake Administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070, Guangdong, China*)

Abstract

Analyzing the measuring value of deep-hole geoelectric resistivity during the earthquakes occurred in Heyuan in the recent two years, we found that be different from the anomaly variation at most geoelectric resistivity stations, the daily mean value curve of deep-hole geoelectric resistivity at Heping station showed the long trend of decline in quiet periods while turning flat or rising before the earthquake. On the basis of analyzing and discussing the data, we believe that the observed changes due to the electrode polarization and the concentration rising changing of conductive particle, which was verified by constructing a three-dimensional finite element model and using the numerical simulation method.

Key words: deep-hole geoelectric resistivity; numerical simulation of finite element; Heping Geoelectric Station