

性特征与地质特征间的对应关系,主要利用孔旁测深曲线对比和正演数值模拟技术手段。定性解释的基础图件包括单支测深曲线、视电阻率拟断面图和平面图,要特别重视局部地电异常特征。本次电法勘探实测资料处理与解释过程如图 7-1-2 所示。

1. 单支曲线分析

单支电测深曲线定性分析的主要目的是确定第四系地层岩性及其富水性与电测深曲线特征间的对应关系。根据电测井资料进行正演计算或对比分析孔旁测深曲线是电测深曲线定性解释的基础,通过反复对比,可以从已知到未知确定含水砂层在测深曲线上的反映特征,找出供电电极距与勘探深度间的对应关系。

(1) 正演理论视电阻率曲线

根据本区地质—地球物理特征,第四系地层因砂层厚度和富水性不同致使电阻率变化较大,总体上第四系上组含水砂层分布较厚,相对呈高阻反映;下组砂层胶结好,粘土层所占比例较大,电阻率较低;基底为侏罗系砂层,电阻率较高。根据区内 Q_{T-2} 钻孔的测井曲线可以建立与之对应的地电模型,其层参数为: $\rho_1=12 \Omega \cdot m$ 、 $\rho_2=16.8 \Omega \cdot m$ 、 $\rho_3=9.2 \Omega \cdot m$ 、 $\rho_4=8.1 \Omega \cdot m$ 、 $\rho_5=9 \Omega \cdot m$ 、 $\rho_6=24 \Omega \cdot m$ 、 $h_1=8.5 m$ 、 $h_2=27.5 m$ 、 $h_3=30 m$ 、 $h_4=50 m$ 、 $h_5=27 m$ (因钻孔资料从 8.5 m 深度开始, $\rho_1=12 \Omega \cdot m$ 是按本区统计结果设定的)。正演计算的理论视电阻率曲线为 KQHA 型,如图 7-1-3 所示,砂层与测深曲线上的 KQ 型部分对应。

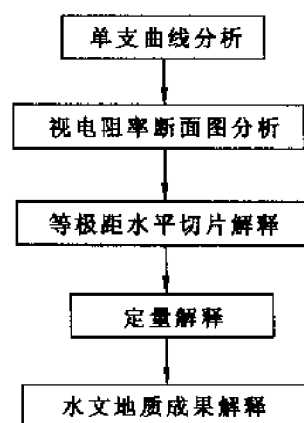


图 7-1-2 实测资料解释与处理流程图

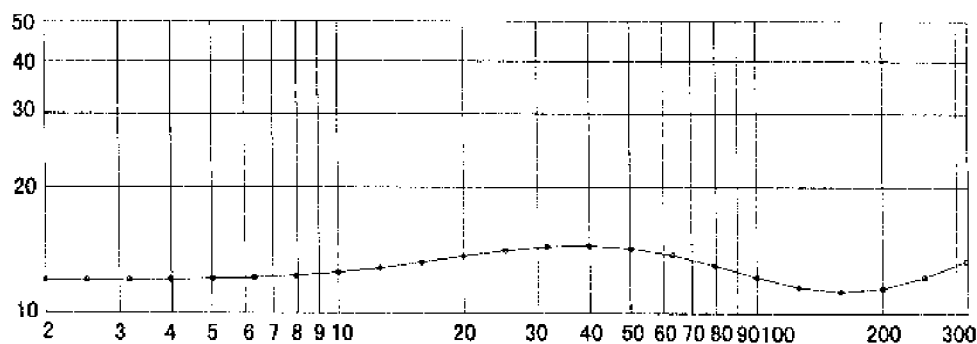


图 7-1-3 Q_{T-2} 钻孔正演电测深理论曲线

(2) 孔旁电测深视电阻率曲线分析

孔旁测深是在钻孔附近进行的电测深,可通过测深视电阻率曲线与钻孔柱状图对比,研究目的层在视电阻率曲线上的反映,为定性、定量解释提供依据。测区孔旁测深点为南检孔、补 29 孔、补 28 孔。

① 南检孔孔旁测深曲线。C3—4 测点距南检查孔(简称南检孔)约 10 m。因缺第四系测井资料,只能从钻孔柱状图上确定含水砂层层位。表土层(0~8.8 m)含砂量较高,并有 0.2 m 厚的砂砾层。其他砂层的具体分布范围为 8.8~11.2 m(厚 2.33 m)、13.21~15.11 m(厚 1.9 m)、33.23~35.63 m(厚 2.4 m),第四系底界面埋深为 82 m。对比结果表明,砂

层的电性反映为相对高阻,在测深曲线上呈局部阶梯状高值特征,对应极距段分别为:12~14 m、17~25 m、50~55 m。基岩则表现为上升型尾支渐近线(图 7-1-4)。

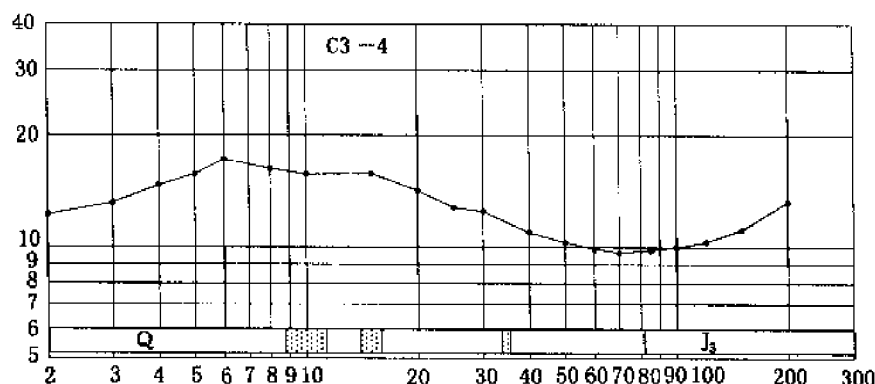


图 7-1-4 南检孔孔旁测深曲线

② 补 29 孔旁测深曲线。C3-24 测点距补 29 孔约 24 m。钻孔柱状图从 16.5 m 开始,无浅部地层资料。其砂层层位为 39.2~40.6 m(厚 1.4 m)、43.4~44.2 m(厚 0.8 m),这两层在电测深曲线上已不可分,整体与以 60 m 极距点为中心的极大值对应,第四系底界面埋深为 93.65 m(图 7-1-5)。

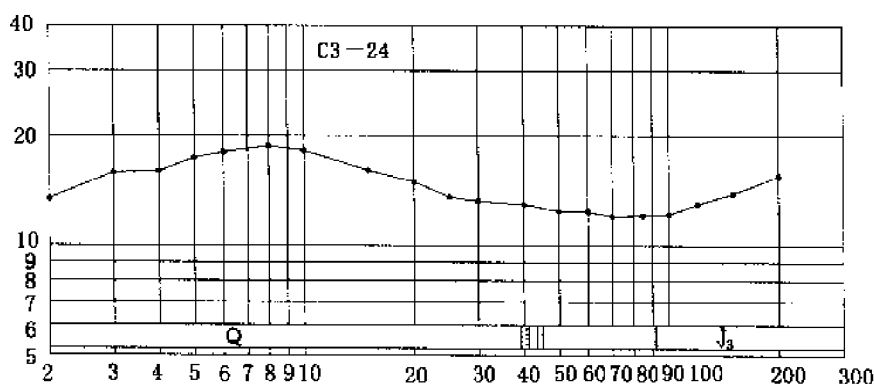


图 7-1-5 补 29 孔孔旁测深曲线

③ 补 28 孔旁测深曲线。C4-11 测点距补 28 孔约 25 m。钻孔柱状图从 6.8 m 开始,无浅部地层资料。其砂层层位为 19.6~20.6 m(厚 1.0 m)、31.6~33.2 m(厚 1.6 m),分别与 30 m、60 m 极距点附近的极大值对应。第四系底界面埋深为 97.8 m,基岩仍表现为高阻尾支渐近线(图 7-1-6)。

④ K₂ 孔旁测深曲线。C5-20 测点距 K₂ 孔约 26 m。其砂层层位为 7.8~8.2 m(厚 0.4 m)、9.8~10.2 m(厚 0.4 m)、13.6~14.6 m(厚 1.0 m)、28.9~32.5 m(厚 3.6 m)、35.5~38.2 m(厚 2.7 m)。前三组砂层整体与测深曲线上极距 11~25 m 间的高阻异常对应,后两层与测深曲线上极距在 40~60 m 间的高阻异常对应(图 7-1-7)。

综合以上分析,可以得出以下结论:

① 第四系上组为主要含水层段,下组富水性差。上组表现为视电阻率相对高阻,下组

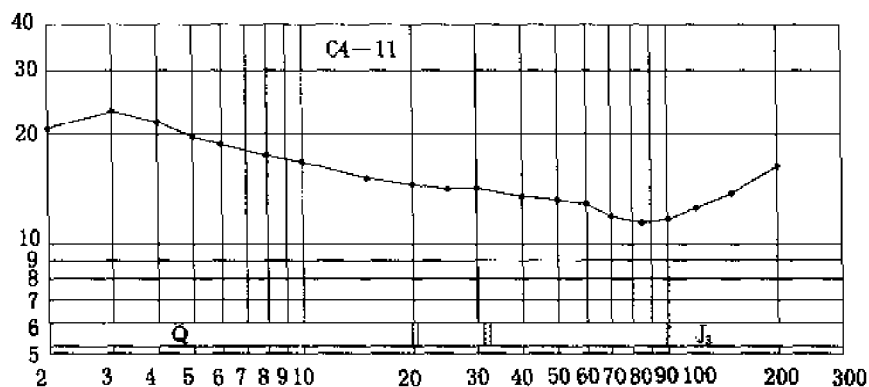
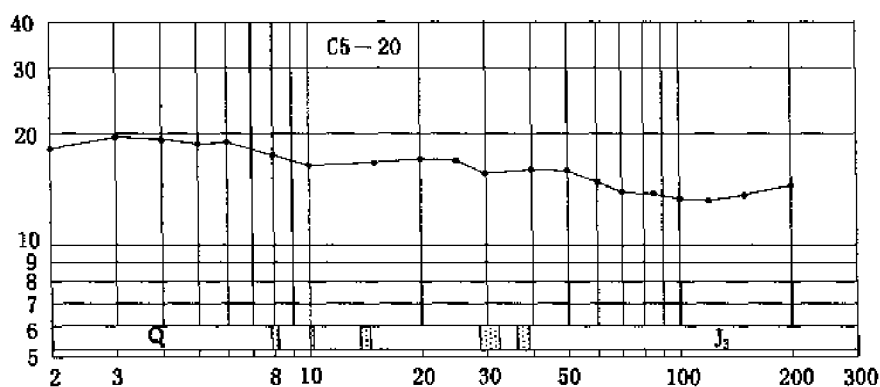


图 7-1-6 补 28 孔旁测深曲线

图 7-1-7 K₂ 孔旁测深曲线

总体上表现为视电阻率相对低阻。

② 第四系中具有一定厚度的砂层在电测深曲线上与较为明显的极大值异常对应,埋深厚度比大于 10 的砂层反映不明显。

③ 当砂层厚度薄或相邻层间距较小时,在电测深曲线上极难分辨单一砂层。

④ 勘探深度与供电电极距的比例因子为 0.6~0.7,极距较小时取 0.7,较大时取 0.6。

(3) 典型实测视电阻率曲线分析

本区实测曲线主要类型为 QQH、KQH、AKQH、KHKQH、QHKH 型,还有部分复杂曲线。总体上,本区电测深曲线尾段都是 H 型,而曲线前段类型较为复杂,与第四系砂层在水平和深度方向上的变化有关,反映了砂层厚度和富水程度的差异,是资料解释的重点。

① QQH 型电测深曲线:如图 7-1-8 所示,此类曲线首支视电阻率值较高(一般大于 $25 \Omega \cdot m$),反映了表土层(小于 4 m)含砂量较多;中、深部地层粘土含量高,因而电阻率较低(可小于 $10 \Omega \cdot m$),形成一个宽大的 H 型。部分地段由于中、深部含砂量的变化,可引起在大 H 型基础上的小 HK 型,如图 7-1-9 所示。

② KQH 型电测深曲线:如图 7-1-10 所示,此类型曲线反映了浅部地层含砂层较厚(富水),视电阻率较大,一般在 $16 \sim 25 \Omega \cdot m$ 之间,而中部层段因砂层厚度和埋深的变化形成 Q 段,深部地层含砂层较少,电阻率较低(可小于 $10 \Omega \cdot m$),形成 H 段。

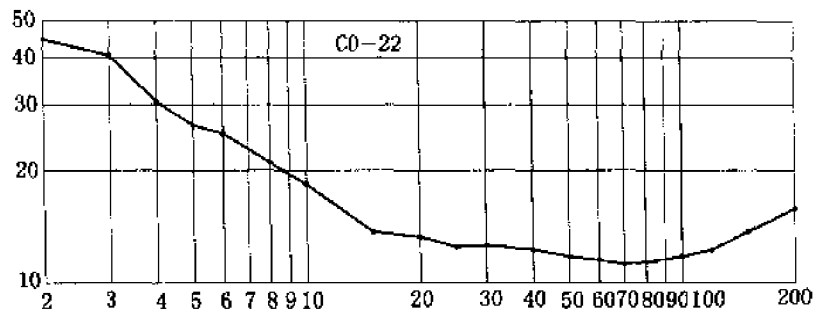


图 7-1-8 C0—22 点 QQH 型电测深曲线

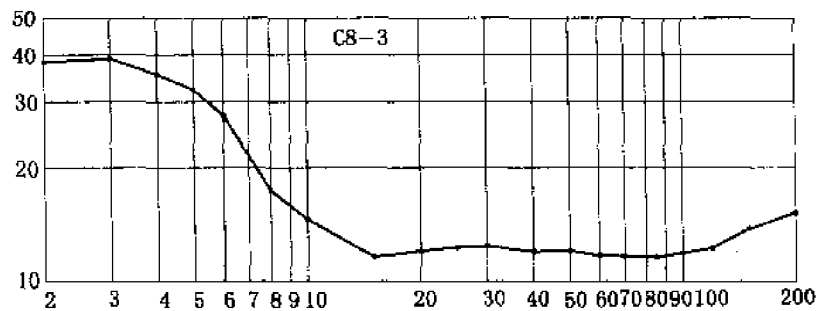


图 7-1-9 C8—3 点 QHKK 型电测深曲线

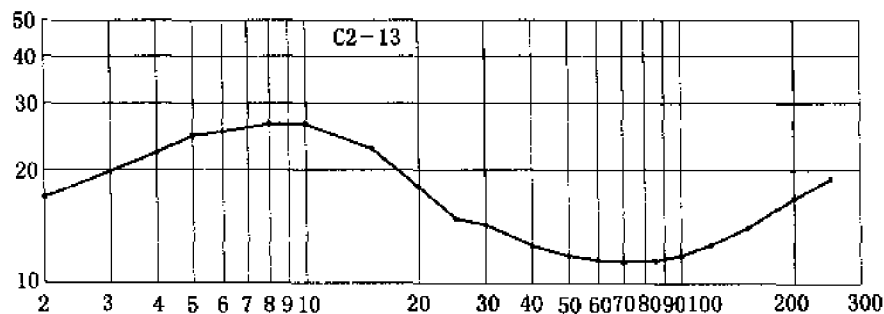


图 7-1-10 C2—13 点 KQH 型电测深曲线

此类曲线对应的富水地层深度一般在 5~30 m 之间,属于浅部层段富水,而中、深部地层为隔水层或弱含水。

③ AKQH 型电测深曲线:如图 7-1-11 所示,此类型曲线与 KQH 型类似,只是富水砂层相对更深。反映了中部地层含砂层较厚(富水),视电阻率较大,一般在 $15 \sim 23 \Omega \cdot m$ 之间,而中下部层段因砂层厚度变化形成 Q 段,深部地层含砂层较少,电阻率较低(可小于

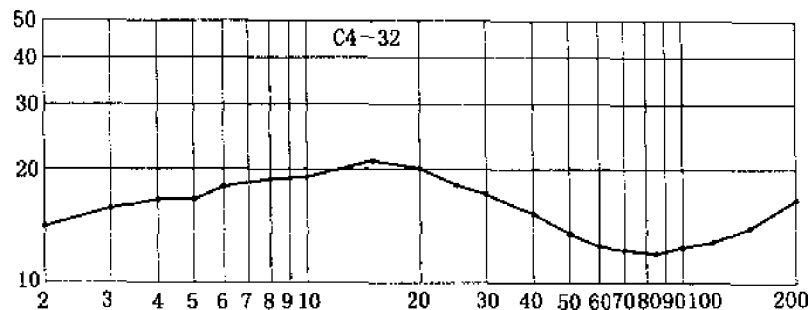


图 7-1-11 C4—32 点 AKQH 型电测深曲线

10 $\Omega \cdot m$), 形成 H 段。此类曲线分布地段富水地层深度一般在 10~40 m 之间。

④ KHKQH 型电测深曲线: 如图 7-1-12 所示, 此类型曲线反映了地表存在砂层(一般小于 5 m), 浅部地层与中部地层相比, 中部地层段含砂层较厚(富水), 视电阻率形成 HK 段, 而中下部层段因砂层厚度变化形成 Q 段, 深部地层含砂层较少, 电阻率较低(可小于 10 $\Omega \cdot m$), 形成 H 段。此类曲线分布地段富水地层深度一般在 10~45 m 之间, 属于浅、中部地层段富水, 而深部地层贫水。

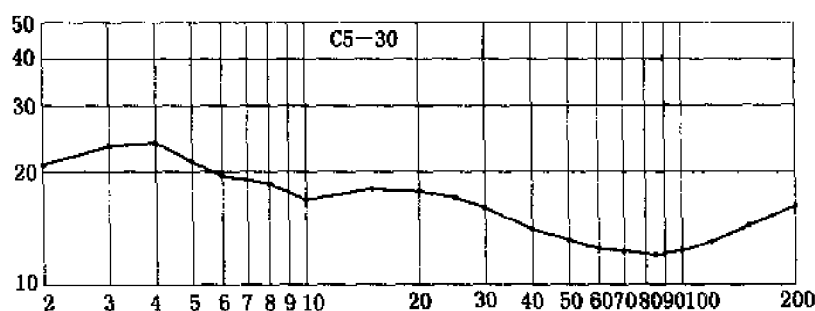


图 7-1-12 C5—30 测点 KHKQH 型电测深曲线

⑤ HKQH 型电测深曲线: 如图 7-1-13 所示, 此类型曲线反映了地表层段以粘土为主, 表现为低阻反应。而浅部地层与中部地层段含砂层分布范围较宽广(富水), 所以视电阻率曲线形成较宽阔大 K 型, 深部地层含砂层较少, 电阻率较低(可小于 10 $\Omega \cdot m$), 形成 H 段。

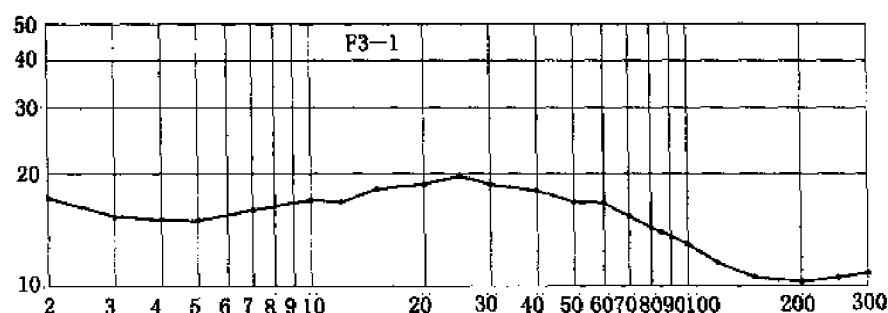


图 7-1-13 F3—1 测点 HKQH 型电测深曲线

此类曲线分布地段富水地层深度一般在 11~60 m 之间, 属于浅、中部地层段富水, 深部地层贫水。

⑥ 其他复杂型电测深曲线: 当地层从浅至深含砂量较少时, 地表、浅部、中部地层段电阻率较小且差异不大, 电测深曲线近似水平(图 7-1-14)。部分测点由于砂层厚度变化, 引

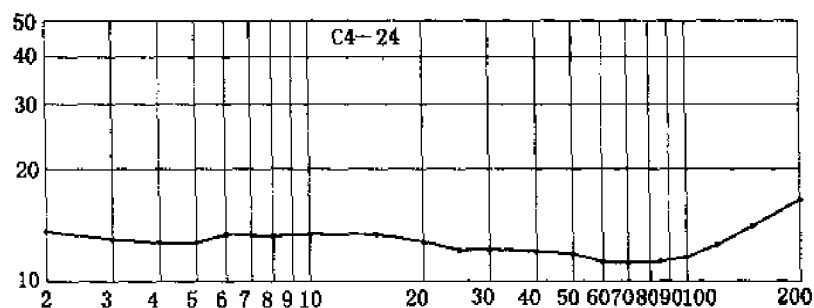


图 7-1-14 C4—24 测点复杂型电测深曲线

起曲线有一定的波动,如图 7-1-15 所示。此类曲线为地层相对贫水的反映。

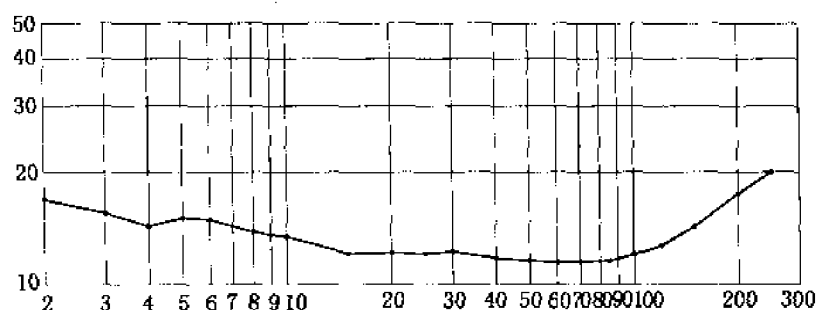


图 7-1-15 C2—23 测点复杂型电测深曲线

2. 视电阻率断面等值线图分析

视电阻率断面等值线图反映了沿测线垂直地电断面内地层的电性变化情况,该类图件能够比较详细、直观地反映地下地质构造特征和各种地质异常现象。

图 7-1-16 为测区各测线实测视电阻率断面等值线图(纵轴为算术坐标)。综合分析各视电阻率断面等值线图可以看出,该区第四纪地层可大体分为 4 个电性层:① 0~5 m 范围内为表土层段,由于表层受局部砂体、地表降水和赋水性等因素的影响,其电性横向变化较大;② 5~40 m 范围内以粉砂质粘土、粘土质粉砂、中砂为主,局部含砂砾,砂岩或砂砾层的孔隙度大且渗透性强,其电阻率随着水文地质条件的不同而有较大变化,当其饱含地下水时,电阻率只有十几至几十欧姆米;③ 40~90 m 范围内为砂、粘土互层,其渗透性差,隔水性良好,为隔水层,该层视电阻率较低,一般为 $8 \sim 12 \Omega \cdot \text{m}$,在等值线图上对应低阻区;④ 大于 90 m 的电性层为侏罗系红层。第①、②电性层为第四系上组,第③电性层为第四系下组,而第④电性层则为侏罗系基岩。

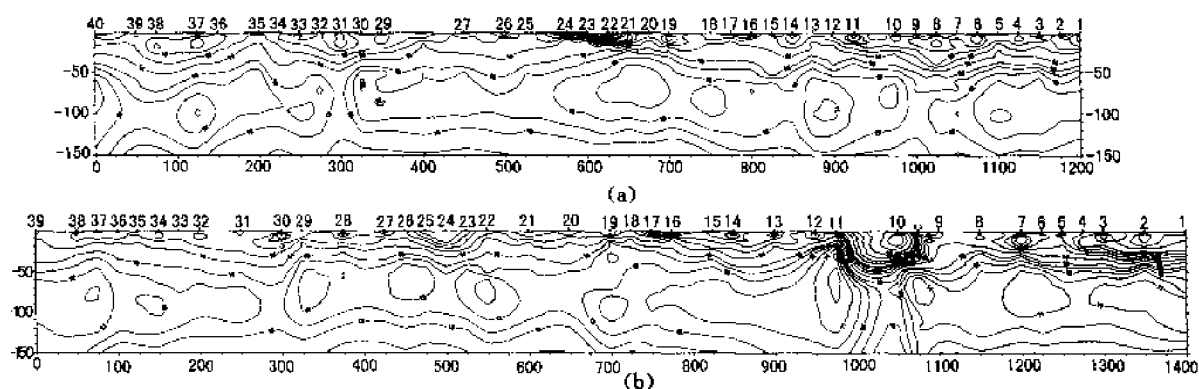


图 7-1-16 测区各测线实测视电阻率断面等值线图

(a) C0 测线视电阻率断面图;(b) C1 测线视电阻率断面图

下面以 C0 测线和 C1 测线为例说明断面图的分析过程:

① 从 C0 测线视电阻率断面图上可以看出,2~6 m 极距范围内视电阻率等值线的横向变化很大,主要受表土层砂体分布不均和富水性变化等因素的影响。6~50 m 极距范围内

视电阻率等值线的变化反映第四系上组地层的岩性和富水性变化情况, 5~12、16~17、21~24 及 28~34 测点间视电阻率值较高, 说明对应地段第四系上组含砂量较高, 富水性较好。在 60~100 m 极距范围内, 电性变化小, 视电阻率值一般小于 $13 \Omega \cdot \text{m}$, 该层以粘土层为主, 渗透性差, 为隔水层, 属于第四系下组。当极距大于 100 m 时, 视电阻率逐渐增高, 等值线近水平, 与侏罗系红层对应。

② 从 C1 测线视电阻率断面图上可以看出, 2~6 m 极距范围内仍为表土层反映, 电性横向变化大, 主要为表土层砂体分布和地表富水性不均所致。6~50 m 极距范围内的视电阻率变化反映第四系上组含水层的电性变化。该范围内, 视电阻率值随水文地质条件的不同有很大的变化, 1~4、9、5~11、20~27 及 30~33 测点间上组地层中含砂量较高, 富水性较好。在极距为 60~100 m 范围内, 电性变化不大, 视电阻率值一般小于 $13 \Omega \cdot \text{m}$, 是第四系下组隔水层的反映。当极距大于 100 m 时, 视电阻率逐渐增高, 等值线近水平且趋于稳定, 反映了第四系基岩电性特征, 11~13、38~39 号测点间基岩面较深。

3. 等极距水平切片图解释

视电阻率平面图能够反映测区地下某一深度(对应某一固定极距 OA)平面内电性的变化规律。大极距的视电阻率平面图反映基底构造形态, 小极距视电阻率平面图反映上覆地层的电性变化。等视电阻率平面图的具体编制方法是: 在测点分布平面图上, 每个测点都对应同一极距的视电阻率值, 然后用插值的方法绘出 ρ_s 等值线, 便得到某一极距的等视电阻率平面图。若选用多个不同极距分别绘制出对应的等视电阻率平面图, 将所有平面图组合起来, 便可得到立体感较强的等视电阻率水平切片图。

图 7-1-17 所示为测区电法勘探视电阻率水平切片图, 对应极距分别为 20 m、30 m、40 m、50 m、60 m、100 m, 相应深度分别近似为 14 m、20 m、27 m、33 m、39 m、65 m。从图 7-1-17 可以看出: ① 总体上, 该测区的中间地段视电阻率值较低, 东西两端的视电阻率值较高, 视电阻率等值线形态反映了第四系地层中砂体分布的平面特征; ② 不同水平切片视电阻率变化的垂向延续性, 反映了砂层分布的垂向变化特征, 即砂层累积厚度变化; ③ 根据砂体分布的范围和垂向变化特征, 可以直观地确定富水性最好的区域位于测区西北部。

4. 定量解释

本区第四系地层内砂层分布无论在深度方向上还是水平方向上都变化很大, 多表现为砂层与粘土层的薄层互层, 使得电测深曲线变化复杂。前期计算机自动反演解释结果表明, 薄层等值现象突出, 不利于砂层特征拾取, 为此我们最终采用了计算机解释与人工解释相接合的方法。为了突出砂层薄层在电测深曲线上的反映, 对每条视电阻率曲线均进行了拟真平均电阻率 ρ_m 曲线的计算, 因 ρ_m 值由横向电阻率 ρ_1 与纵向电阻率 ρ_n 换算而来, 对电阻率各向异性反映灵敏(图 7-1-18), 突出砂层的电性反映。

但是, 尽管采用 ρ_m 曲线可以在一定程度上提高砂层分辨率, 但当薄砂层间距与埋深比小于 1/10 时, 因受等值原理的作用而只能将其合并为一个电性层, 无法细分。

在对单支测深曲线进行定量解释的基础上, 按测线汇总解释结果, 并与视电阻率断面图绘制在一起, 便形成了各测线电性—水文地质综合解释成果图。进一步地, 我们将各测点下方第四系含水砂层的厚度进行累加, 可绘制出勘探区含水砂层累计厚度等值线图。考虑到地表潜水面深度的季节变化和取水层位, 测区主要富水砂层厚度取值深度范围为 5~45 m。

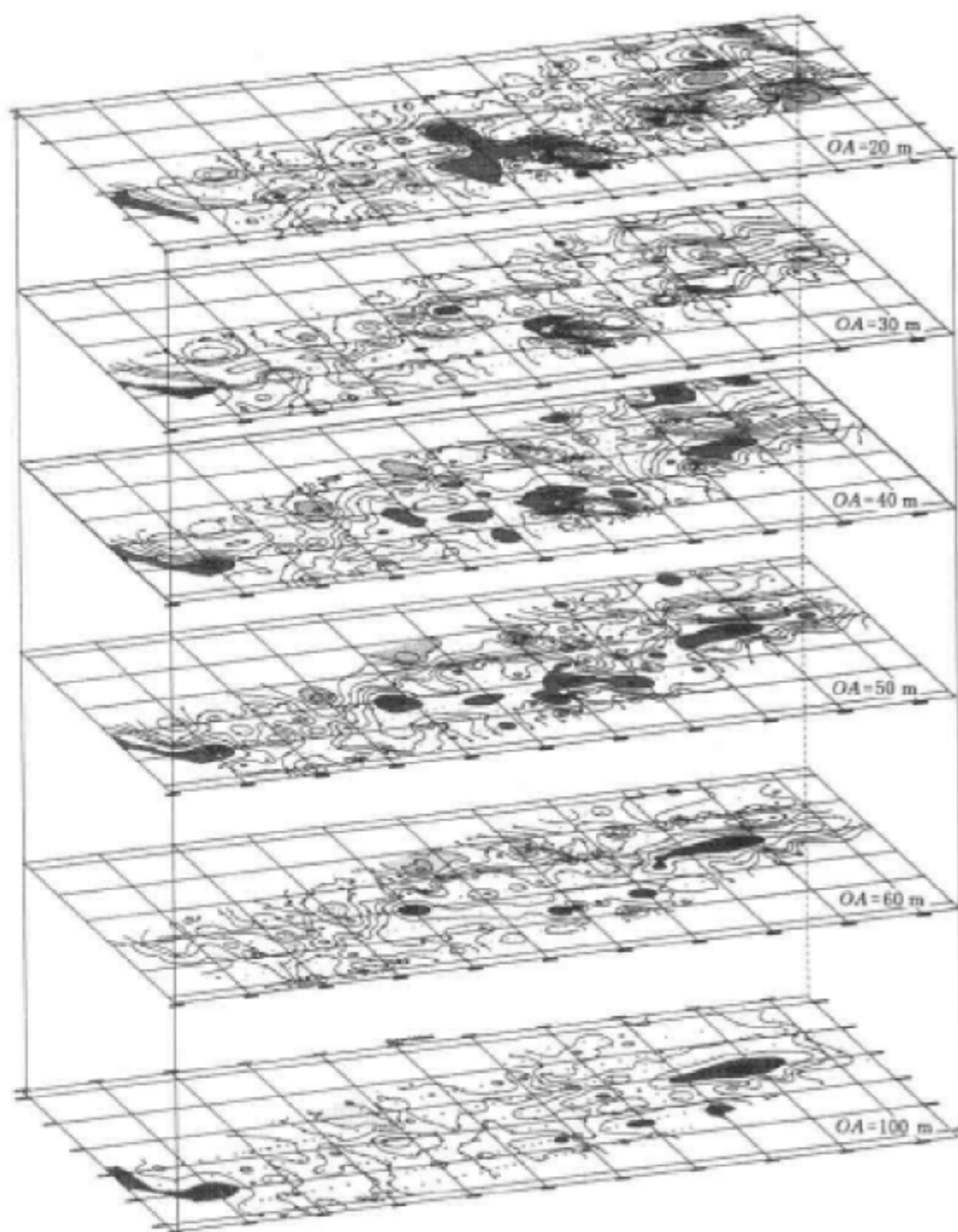
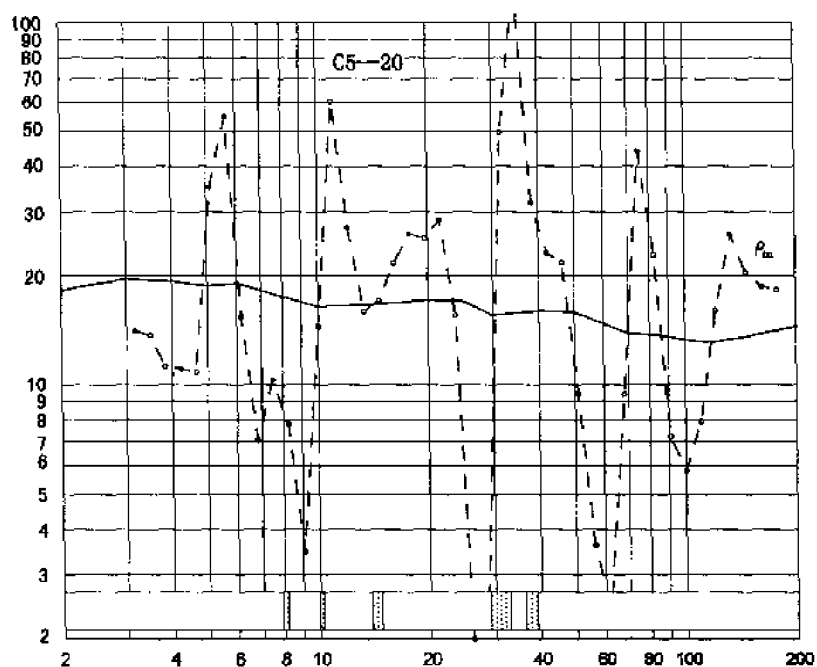


图 7-1-17 测区等级距水平切片图

根据以上解释结果,分别绘制出测区第四系含水砂层累计厚度等值线图(图 7-1-19)、测区第四系基岩深度等值线图(图 7-1-20)等图件。

图 7-1-18 C5-20 测点 ρ_s 曲线与 ρ_m 曲线对比图

7.1.4 地质结论

本勘探实例表明,根据电法勘探资料可以划分第四系含、隔水层,确定含水砂层分层厚度和总厚度,据此可以圈定出第四系相对富水区,同时还可确定第四系下伏基岩面的埋深和起伏状态,进一步结合水文钻探和抽水试验资料能对第四系松散层的富水性进行定量预测,从而为提高开采上限和松散层孔隙水害的防治提供基础地质资料。

(1) 区内相对富水地层

第四系上组地层为富水地层,下组为隔水层(含水砂层很少)。测区主要富水砂层深度一般小于 45 m。

(2) 富水分布范围

测区主要含水砂层层位深度范围为 5~45 m,主要砂层总厚度在 3~9 m 之间(见图 7-1-19)。根据综合定性与定量解释结果,并参考现有钻孔的水文地质资料,圈定砂层厚度大于 5 m 的地段作为相对富水区,可将其划分为 6 个相对富水区(图 7-1-21),分别命名为 A、B、C、D、E、F 富水区。其中 A、B 富水区面积最大,富水性最好。C 富水区次之,D、E、F 面积最小。

(3) 第四系厚度

第四系厚度范围为 82~110 m,测区东南部基岩埋深较浅,西北部最深。

水文钻探验证情况:测区内共布置 7 个水文钻孔,并三个一组进行了抽水试验,钻探与抽水试验结果与电法勘探成果吻合程度较高。

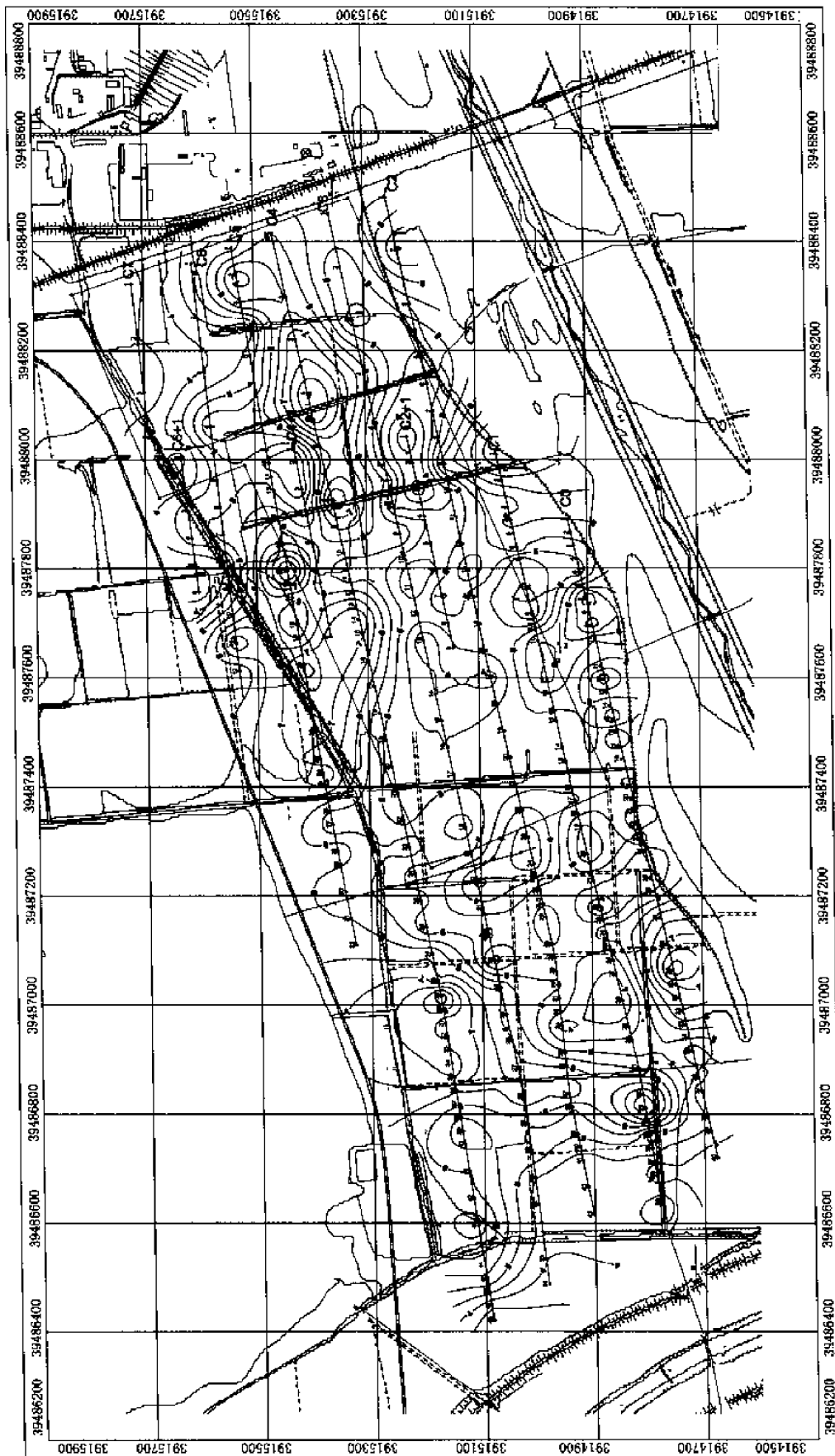


图 7-1-19 测区第四系含水砂层累计厚度等值线图

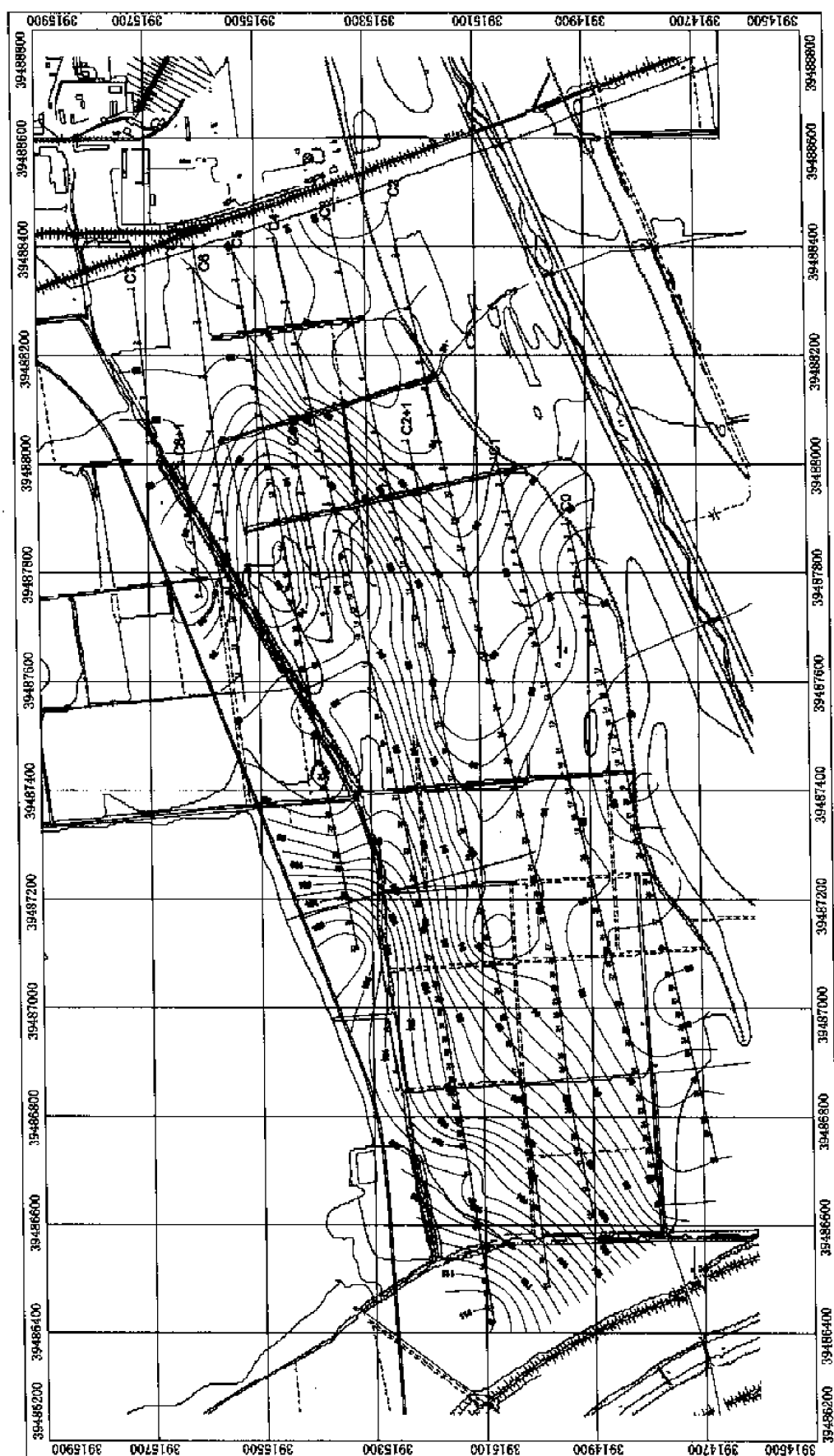
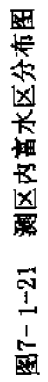


图 7-1-20 测区第四系基岩深度等值线图



7.2 河北 ZC 煤矿深部水源井电磁法勘探

7.2.1 地质概况

测区位于河北 ZC 煤矿三井主井口西侧。该区域内主要有 F_{10} 、 F_{11} 断层,可采煤层为 6 煤与 9 煤,9 煤埋深从 -350 m 到 -5 m ,厚约 2.5 m ,其底板下伏岩层主要为大青灰岩与奥陶纪灰岩,是本区的主要含水层。

7.2.2 野外施工方法

1. 测点布置

由于测区北部为居民建筑楼群,东部为发电厂,根据本次探测目的与现场的可施工条件,共布置测线 4 条,测线 1、2 测点点距 50 m ,测线 3 测点点距 30 m ,实际完成 36 个测点的测量工作,测点布置见野外施工布置图(见图 7-2-4)。

2. 施工方法

本次地面探测采用的是澳大利亚产 SIROTEM—Ⅲ型瞬变电磁仪,该仪器具有数据采集自动化程度高、压制干扰能力强、实时监控等特点。

具体技术参数设置为:采用边长 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 重叠回线装置,电流 $6 \sim 7\text{ A}$,32 个时间窗口序列,根据干扰大小,叠加次数分别选择 256 次与 512 次。

7.2.3 实测资料处理与解释

鉴于本次探测对浅部要求不高,并考虑到早期视电阻率受关断时间影响较大以及地表干扰因素的影响,在绘制视电阻率断面图时从地表下 150 m 处开始,略去了浅层部分。由于每个测点下方地质情况各异,因而测深也不尽相同。相对来说,测线 1、2 上各测点探测较深,测线 3、4 较浅,因而测线 1、2 视电阻率断面图绘制到地表下 650 m 深度,而测线 3、4 绘制到 600 m 深度。

1. 视电阻率断面图分析解释

综合 4 条测线的反演视电阻率断面图,对于瞬变电磁探测,该探测区域内地层的视电阻率值主要在 $1 \sim 40\ \Omega \cdot \text{m}$ 之间。整体上来看,测线 1、2、3 视电阻率值纵向横向上变化趋势基本一致。横向上从小号点到大号点,视电阻率值由小到大;纵向上由浅至深逐渐增大。

如图 7-2-1 所示,测线 1 上低阻异常区主要有两处,一处是 2~3 号测点之间, $-300 \sim -450\text{ m}$ 深度范围内,另一处是 6 号测点处,深度 $-500 \sim -600\text{ m}$ 之间,视电阻率值小于 $4\ \Omega \cdot \text{m}$,且呈现封闭状,为含水性较强的表现。

如图 7-2-2 所示,测线 2 上的低阻异常位于 3~5 号测点之间, $-400 \sim -650\text{ m}$ 之间。从图中可以看到 $4\ \Omega \cdot \text{m}$ 的等值线封闭,内部包含两个封闭且独立的低于 $4\ \Omega \cdot \text{m}$ 视电阻率等值线,一个是 3~4 号测点之间, $-400 \sim -500\text{ m}$ 之间的封闭圈,另一个就是 5 号测点处, -550 m 下方的半封闭圈。推测两处含水性较强且连通。

对测线 3、测线 4 也作同样分析,反映的视电阻率变化与测线 1 基本一致,低阻异常区

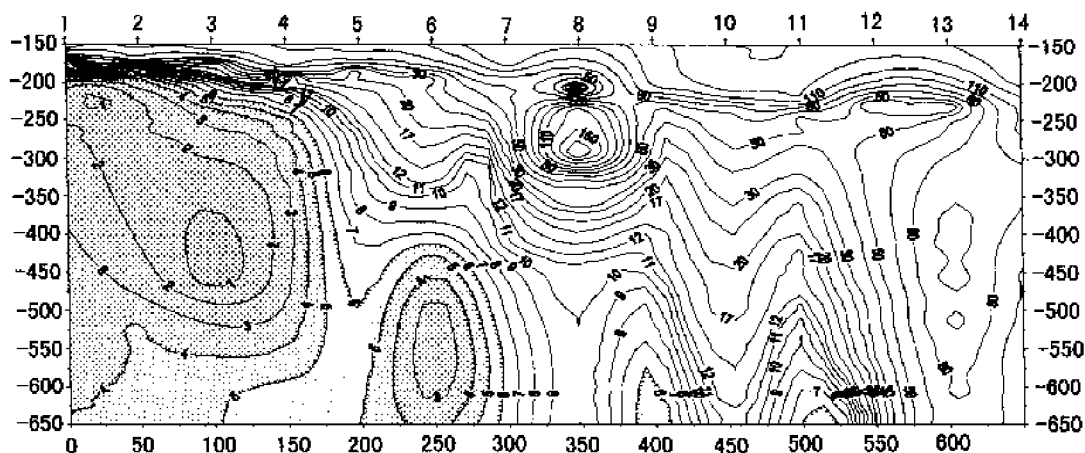


图 7-2-1 瞬变电磁测深 1 测线反演视电阻率断面图

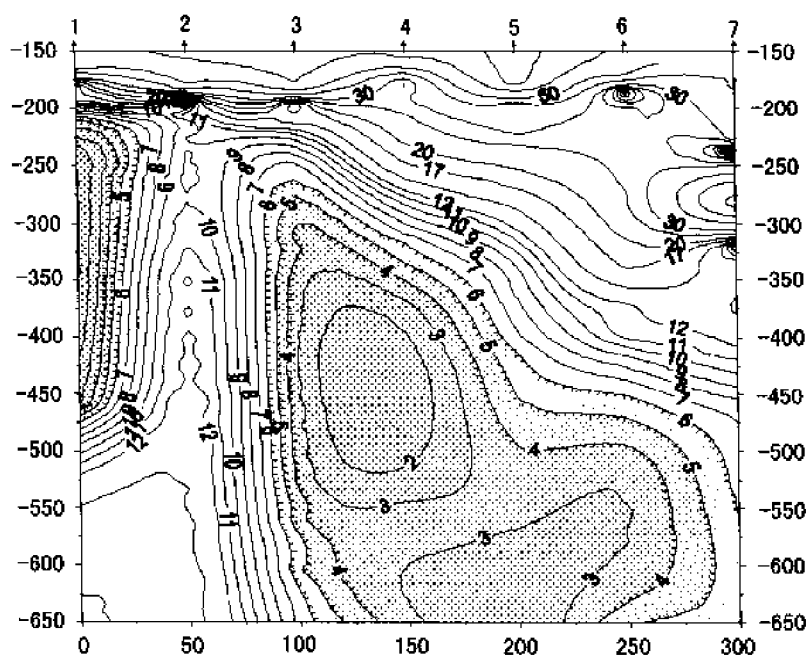


图 7-2-2 瞬变电磁测深 2 测线反演视电阻率断面图

有两处。

2. 视电阻率水平切片图分析解释

水平切片图反映的是在同一深度上视电阻率的变化情况,从图上可以看出异常区在探测区域内的分布范围。图 7-2-3 是 -550 m 深度视电阻率等值线水平切片图,该图上视电阻率值的变化趋势是由左到右逐渐变小,从 $60\ \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $1\ \Omega \cdot \text{m}$ 。本切片图上有 2 处低阻异常区,分别为 I、II,视电阻率值低于 $4\ \Omega \cdot \text{m}$,等值线呈现封闭状。由于 II 异常区北部有矸石堆和大量金属设备干扰较大,应给予排除。

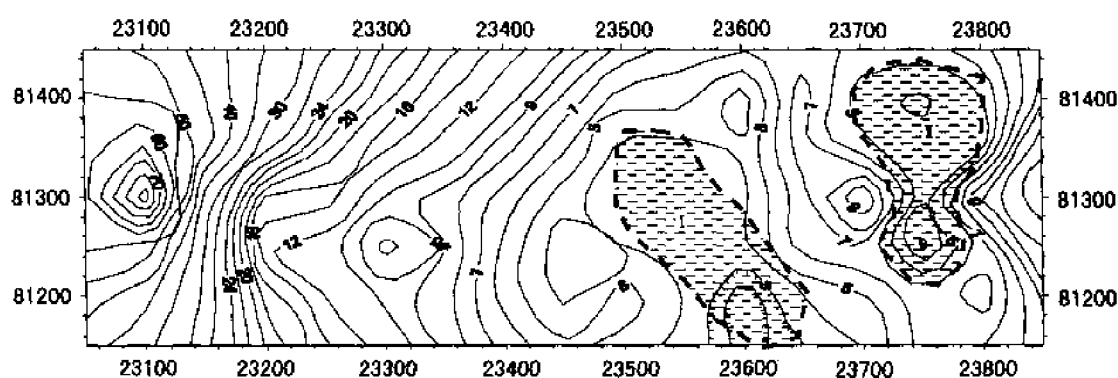


图 7-2-3 瞬变电磁测深—550 m 反演视电阻率切片图

7.2.4 勘探结果

地面瞬变电磁测深资料解释如图 7-2-4 所示,根据异常的范围、视电阻率大小及断层构造情况,得出地面水源井孔位应位于异常 I 内,具体孔位可根据地表建筑情况决定。

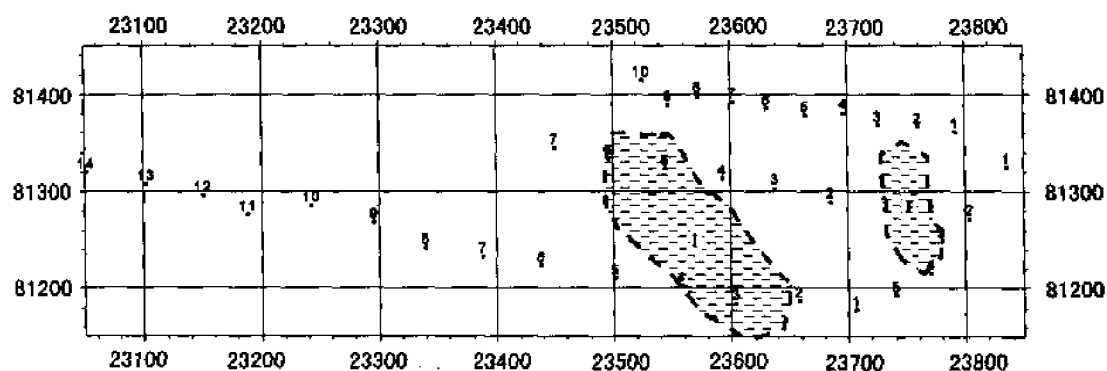


图 7-2-4 瞬变电磁测深勘探成果图

8 煤矿水文物探新技术

8.1 三维分布式电阻率成像技术

传统的电阻率方法由于场源及接收装置均安置在地表,电流密度随深度呈指数衰减,随着目标体埋深的增加,分辨率迅速降低。同时,因观测点少且稀疏,造成数据采集不完备,很难观测到电场分布的整体特征,致使地球物理反演问题的定解条件欠定,多解性问题突出,勘探精度和可靠性很难满足当前工程、环境勘察的要求。近年发展起来的高密度电阻率法属于二维断面观测方式,在数据采集密度和采集量上有一定程度的提高,其勘探精度、准确度有了一定改善,显示出加密数据采集工作量的优势,但其工作效率和勘探详细程度还无法完全满足精细勘探的需求。

20 世纪 90 年代以来,国内外直流电法勘探的研究热点可概括为:① 智能式数字电法仪及其配套装备;② 电法二维和三维数值模拟技术;③ 以电阻率成像为核心的电法二维和三维反演算法;④ 特殊工程应用,如井一地、矿井直流电法勘探、水工环境电法勘探。

总的发展趋势为:① 勘探任务从一维层状介质向二维、三维地质异常体发展;② 野外观测从单点单装置观测(如电测深)向多点多装置观测(如高密度电法)发展,近期提出三维动态观测方式;③ 数值模拟从二维有限元、二维有限差分、积分方程法向三维有限元、三维有限差分和三维边界元法发展,正演计算速度和计算精度都显著提高;④ 新的反演算法如遗传算法、模拟退火法在电法反演计算中得到应用。目前,得益于电器元件和计算机技术的发展,仪器自动化程度和抗干扰能力明显提高,正演数值计算和反演计算速度和精度显著改善,直流电法实现三维勘探目标的物质条件已经具备。地震勘探从二维走向三维的技术优势已在勘探实践中得到充分展示,高密度电法应用以来取得的良好效果也充分说明三维电阻率成像系统的开发和应用,无论其勘探方式、工作效率还是解决地质问题的应用效果都会引发革命性的变化。

为顺应这一变化,国外多家地球物理仪器公司生产二维电阻率测量系统,如 IRIS INSTRUMENTS 公司的 SYSCAL SWITCH PLUS 和 SYSCAL SWITCH Pro,Geometrics 公司的拖拽式电法仪,OYO 公司的 McOHM-EL,AGI 公司的 STING/SWIFT Earth Resistivity Meter,ABEM 公司的 LUND IMAGING SYSTEM,和 Geoscan 公司 RM4 Resistivity Meter 等。国内 GEOPEN 公司的 E60BN 电阻率成像仪,重庆地质仪器厂生产的 DUK2A、重庆奔腾数控技术研究所生产的 WDJD-2 多功能数字直流激电仪等也配备了多电极系统。虽然国产仪器的某些性能指标达到国外高密度电法仪的水平,但在制造工艺、自动化程度、抗干扰能力方面与国外仪器存在差距。

在电阻率成像软件系统方面,目前应用较为广泛的是 GOTOMO SOFTWARE 公司的

RES2DINV、RES3DINV 和 AGI 公司的 EarthImager 2D、EarthImager 3D。这些软件都以有限差分法正演计算和平滑最小二乘法反演计算为核心,均采用了 Windows GUI 技术。国内关于电阻率成像算法的研究主要集中在高校和中科院地质地球物理研究所,涉及广泛但不系统,计算速度和精度不尽如人意。

8.1.1 三维分布式电阻率成像系统

三维分布式电阻率成像技术借鉴了三维地震勘探的技术思想,它是一种多点供电、面积测量,勘探区域多次覆盖、电极转换有线遥控的三维电阻率成像技术。该项技术的主要优势在于:① 采用三维观测系统,数据采集量大大增加,能够全面研究电场三维分布特征,其对应的地球物理反演问题由欠定转为超定,配合以三维电阻率成像技术的应用,能更精细地反映地质异常体的几何、电性特征,因此具有重要的推广应用价值;② 一次性面积方式布极,利用中继站或三根控制线实现接收和测量电极的遥控转换,大大提高了电法观测的自动化程度,使野外生产效率较之传统勘探方式提高数十倍;③ 采用可调节的低频方波供电,并将方波比较读数法的思想用软件方式实现,通过固定频率发射、固定频率接收和控制采样起始时间等手段可显著提高仪器抗干扰能力;④ 作为配套技术,该系统在增加一个孔中供电电源的情况下,可以转换为孔—地三维电阻率成像系统,由于供电电源靠近勘探目标体,深部地质体的异常响应将被明显放大,从而在断层含(导)水性、灰岩岩溶探测和采空冒落裂隙发育区动态监测等方面取得理想的应用效果;⑤ 电法三维数据体可视化技术的运用,有利于多角度多侧面分析研究地下介质电性异常特征;⑥ 真三维自动反演算法实现了电法勘探资料定量解释的自动化。

三维分布式电阻率成像系统的硬件部分由发射机、接收机和电极转换开关及专用多芯电缆组成。通常采用的装置形式有两极装置、单极—偶极装置和偶极—偶极装置三种。两极装置形式把供电极 B 和测量极 N 置于无穷远处,电极排列形式如图 8-1-1 所示。

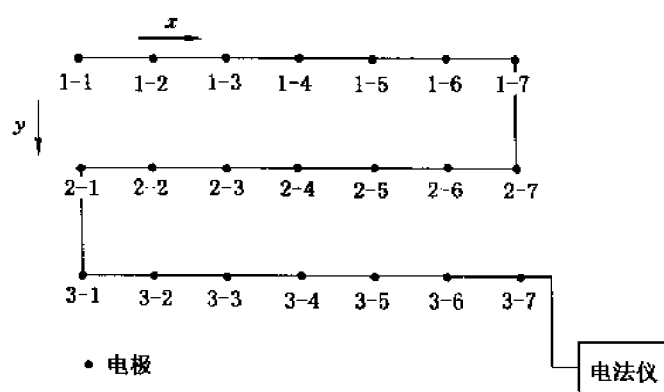


图 8-1-1 三维分布式电阻率成像系统的电极排列方式

8.1.2 分布式电阻率成像系统的三维数值模拟

选用如图 8-1-2 所示的地电模型,异常体位置在水平方向位于 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的矩形域内,沿着与 x 轴斜交方向延伸,断面形状为纺锤形,电阻率为 $0.1\ \Omega \cdot \text{m}$,围岩电阻率为 $10\ \Omega \cdot \text{m}$ 。在地面布置一个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 电极系,分别在每一个电极位置放置点电源,计算其余电极位置的电位,共需进行 99 次正演计算。利用两极装置形式计算视电阻率 ρ_s ,根据电极

互换原理,在第 i 个电极位置供电,可得到 $100-i$ 个位置的视电阻率 ρ_s ,整个电极系完整计算共可以得到 99×50 个位置的视电阻率 ρ_s ,这也是三维直流电法勘探只适合于工程勘察的主要原因之一。

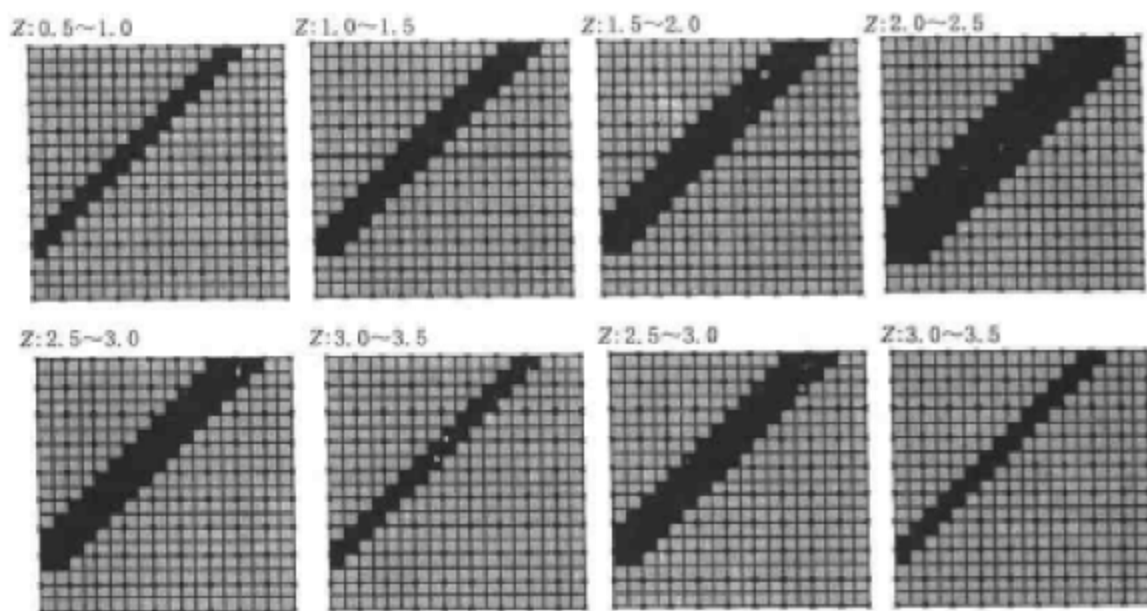


图 8-1-2 地电模型示意图

正演计算所得的不同深度视电阻率切片图如图 8-1-3 所示。从深度 $h=1$ m 的切片图上可以清晰地看出异常体的位置,因为异常体随深度的增加而增大,深度 $h=2$ m、3 m、4 m 的切片图上的异常的范围也逐渐增大, $h=5$ m 深度的异常范围与 $h=4$ m 深度的异常范围基本一致,到 $h=7$ m 深度时对应异常体的位置的视电阻率开始增大了,说明已经过了异常

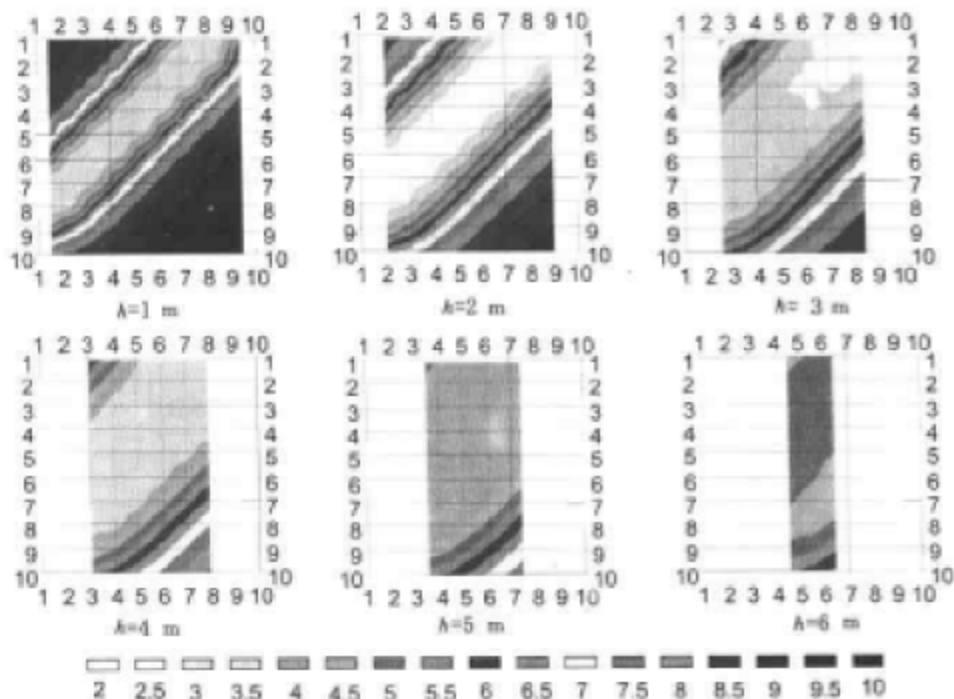


图 8-1-3 三维分布式电阻率成像系统的不同深度水平切片图

的下底边界。从正演模拟视电阻率切片图的分析可知,三维直流电法分辨率非常高,这与高密度的数据采集是分不开的,另外,真实深度大约等于极距深度的 $1/2$ 。

8.1.3 应用实例

某市新华书店建成后,逐渐出现地面、墙面开裂情况,经初步勘查认为是一废弃人防工程所致。三维分布式电阻率成像系统的工程布置如图 8-1-4 所示。

施工过程为:选择 1-1 点为供电点,逐点测量 1-2, 1-3, ..., 2-1, 2-2, ..., 3-1, 3-2, ..., 3-7 各点的电位和供电电流强度,可求得各测量点的视电阻率值。然后再以 1-2 点为供电点,逐点测量 1-3, 1-4, ..., 2-1, 2-2, ..., 3-1, 3-2, ..., 3-7 各点的电位和供电电流强度,依此类推,直到供电点移到 3-6 点为止。图 8-1-5 为 1-4 号点供电,其余各点顺序测量的示例。

实测极距 $a=2\text{ m}, 4\text{ m}, 6\text{ m}, 8\text{ m}$ 的视电阻率水平切片图分别如图 8-1-6~图 8-1-9 所

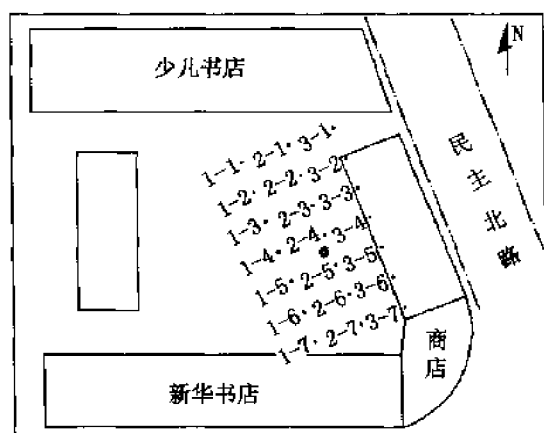


图 8-1-4 工程布置图

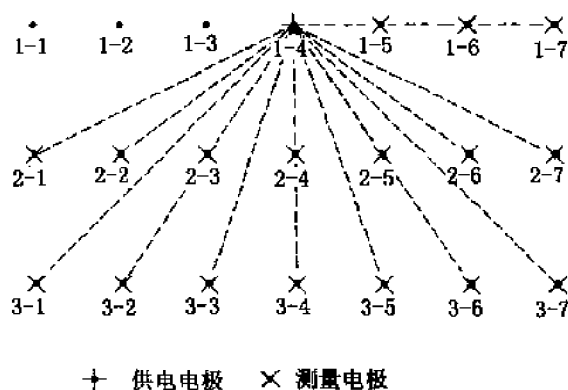


图 8-1-5 三维电阻率成像系统施工示意图

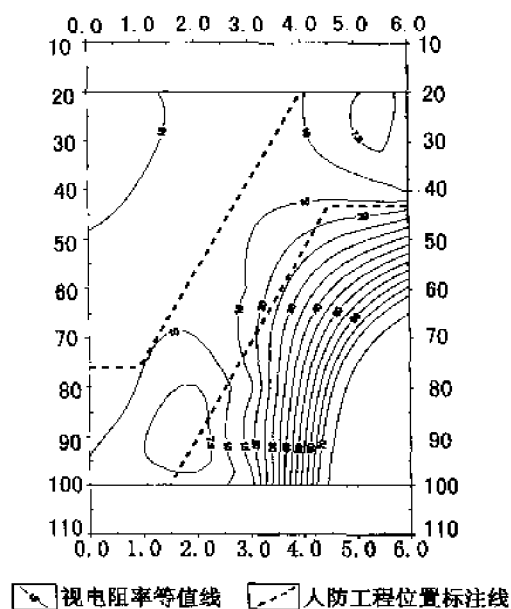


图 8-1-6 水平切片图($a=2\text{ m}$)

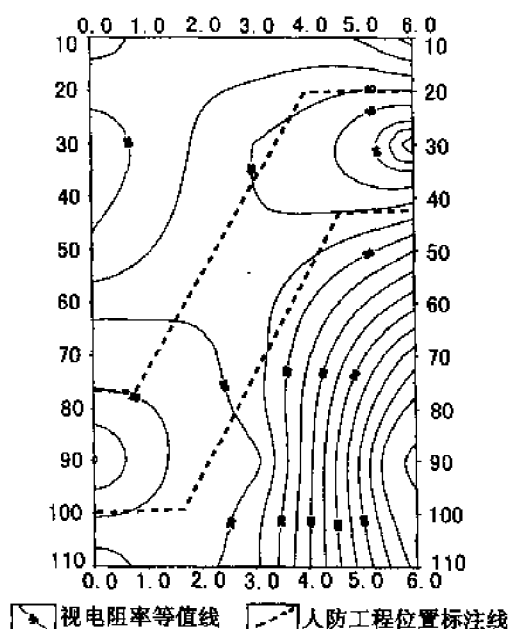


图 8-1-7 水平切片图($a=4\text{ m}$)

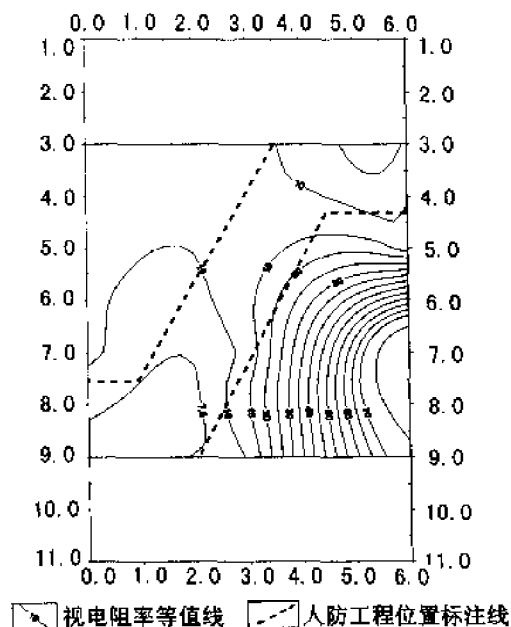


图 8-1-8 水平切片图($a=6$ m)

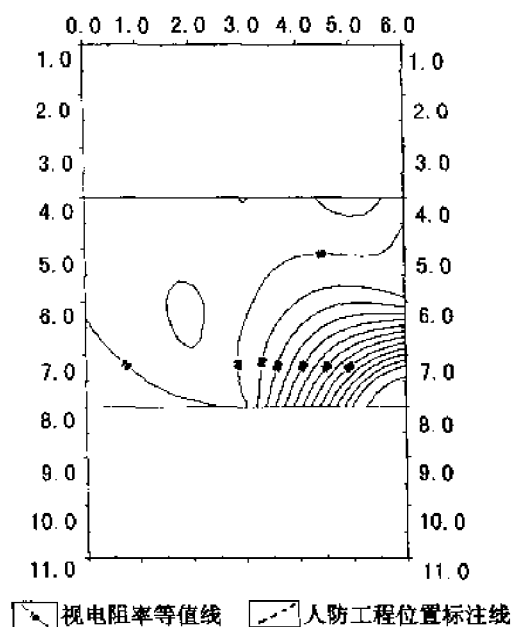


图 8-1-9 水平切片图($a=8$ m)

示。由极距 $a=2$ m 水平切片图可以看出,NE—SW 向有一低阻条带,根据钻孔资料可知,低阻带为地下人防工程塌陷充填的反映。图 8-1-10 为三维透视图,直观地显示地下人防工程的形态。

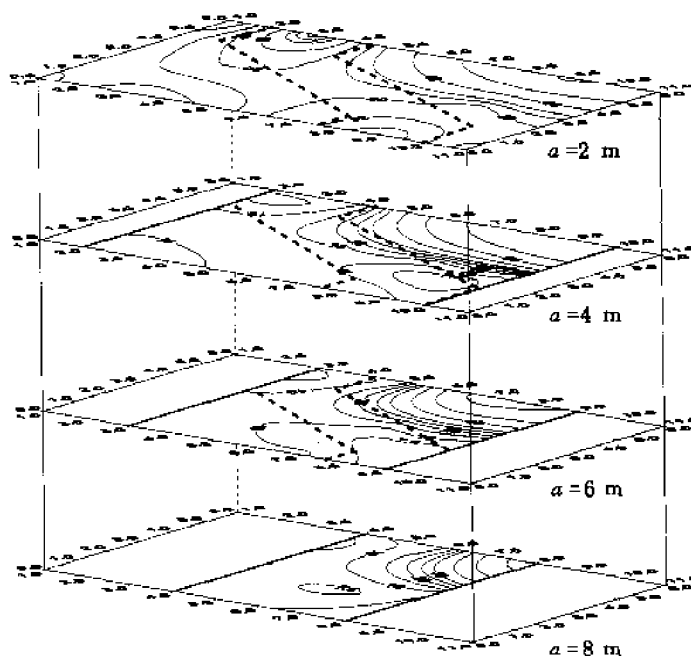


图 8-1-10 三维透视图

通过以上对三维直流电法勘探的方法和原理的研究,可以看出三维分布式电阻率成像系统较传统直流电法勘探具有信息量大、精度高等优点,在水工勘查中有较好的应用效果。

8.2 井—地三维电法勘探技术

如果将供电电极放置在钻孔内,而在地面进行测量,形成井—地电法观测系统,可视为三维分布式电阻率成像的一种特殊施工方式。

如图 8-2-1 所示,将供电电极放置在勘探孔中不同深度(图中 A、B、C、D、E 所示),然后采用与地面三维分布式电阻率成像系统相同的方式布置地面测量电极。实际测量时,对应每一个供电电极位置,逐次测量地面相邻两个电极间的电位差,并转化为视电阻率。

选用如图 8-2-2 所示的地电模型,通过三维数值模拟可以分析对比井—地三维电法勘探的地质效果。所选用的异常体为一长 200 m、宽 40 m、高 30 m 的长方体,电阻率为 $0.01 \Omega \cdot \text{m}$,围岩电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,测线与异常体垂直,横截面面积为 $40 \times 30 \text{ m}^2$ 。

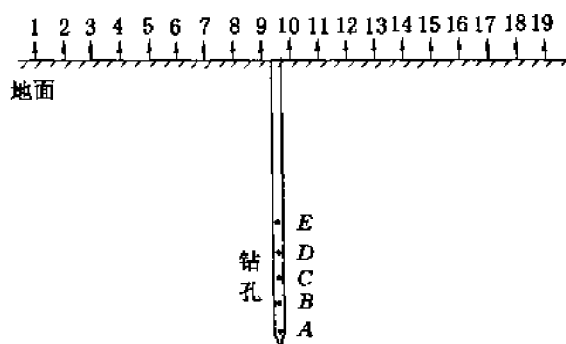


图 8-2-1 井—地电法施工示意图

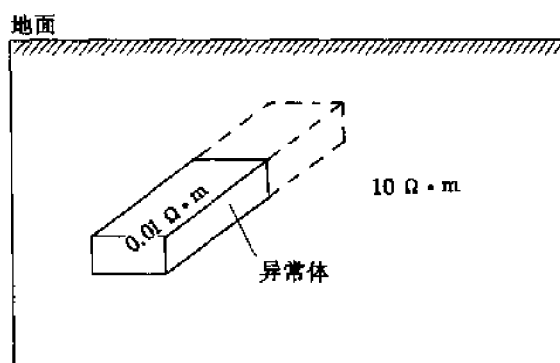


图 8-2-2 地电模型示意图

如图 8-2-3 所示,假设钻孔穿过异常体中心。供电点分别置于钻孔内 -150 m 、 -120 m 、 -100 m 、 -80 m 、 -60 m 、 -40 m 、 -20 m 、 0 m 深度;测量电极均匀布置在地面 $-150 \sim 150 \text{ m}$ 范围内,点距 10 m ,共计 31 个测量电极,形成的观测系统如图 8-2-3(图中射线为测量电极中心与供电点的连线)所示。

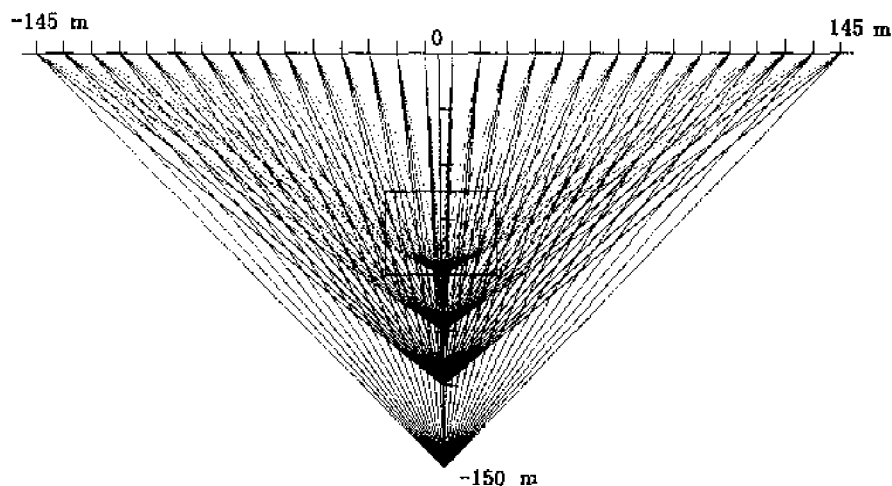


图 8-2-3 井—地电法勘探系统示意图

图 8-2-4 为井—地电法视电阻率剖面曲线图,横轴为测量点位置,纵轴为视电阻率,曲线 1、2、3、4、5、6、7、8 分别对应深度为 -150 m 、 -120 m 、 -100 m 、 -80 m 、 -60 m 、 -40 m 、 -20 m 、 0 m 供电点所得的曲线。从图中可以看出在水平位置 $-145\sim-95\text{ m}$ 和 $95\sim145\text{ m}$ 范围内电阻率变化较大, $-95\sim95\text{ m}$ 范围内视电阻率变化较为平缓,说明 $-95\sim95\text{ m}$ 范围的结果能反映地质构造的情况,而 $-145\sim-95\text{ m}$ 和 $95\sim145\text{ m}$ 范围内的结果是不可靠的,这在视电阻率断面图上也反映出来了。结合图 8-2-3 射线示意图可知,供电点在 -150 m 、 -120 m 、 -100 m 、 -80 m 、 -60 m 深度时,射线部分或全部通过异常体; -60 m 深度供电点位于异常体内;在 -40 m 、 -20 m 、 0 m 深度时,它们的射线在异常体上,不通过异常体。由射线分布结果可以推知,异常体对 0 m 深度供电的测量结果影响应该最小;对 -20 m 深度供电的测量结果影响也应不大;而 -40 m 深度供电点与异常体非常靠近,根据低阻异常体对电流线的吸引作用可知其测量结果受异常体的影响稍大;对 -60 m 、 -80 m 深度供电的测量结果影响应该最大;对 -100 m 、 -120 m 、 -150 m 深度供电的测量结果的影响较大,且逐渐减小。

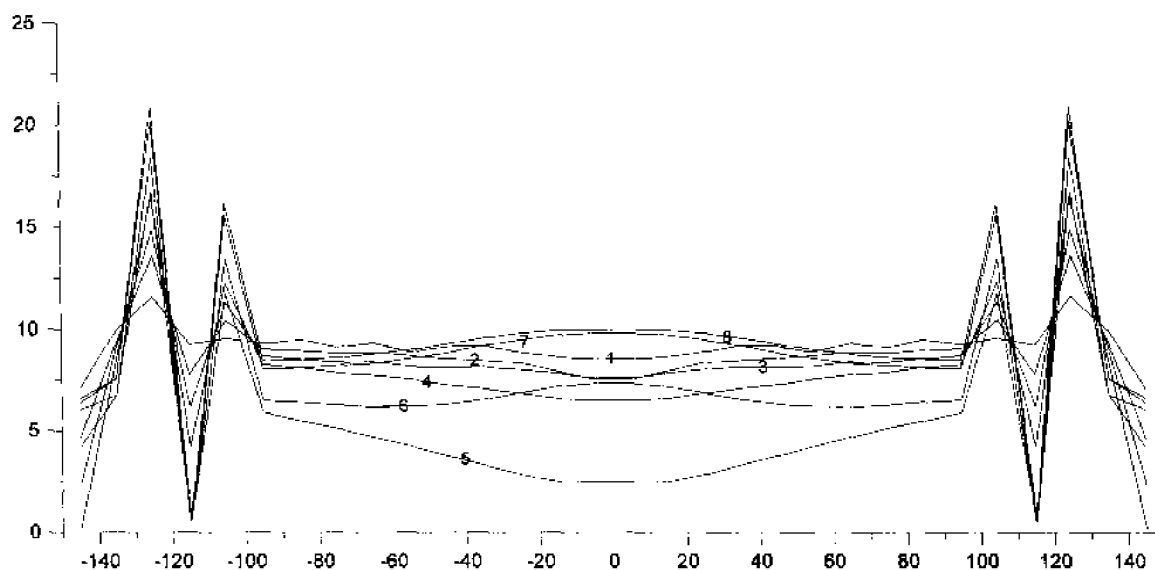


图 8-2-4 井—地三维电法视电阻率理论曲线

8.3 巷道掘进头钻孔超前探技术

利用井下钻孔进行的超前探技术是应煤矿井下巷道掘进安全的需要而提出的。一方面,水害是影响煤矿安全生产的最大隐患之一,而水害主要发生在巷道掘进和开采两个阶段;另一方面,近些年来对于开采阶段突水灾害的预测做了许多的水文物探工作,积累了丰富的经验并且较好地预防了采动引起的突水事故发生。但是,由于受施工空间的限制,巷道掘进中的前方水文地质情况一直没有有效的手段,普遍采用的手段就是在可疑区域打探孔,但用数量有限的探孔推断前方水文地质情况具有很大的局限性,无法确定前方岩层赋水性的三维空间分布情况,无法预测巷道掘进后三维空间内流体的运移情况。针对这种情况,本

书提出了利用有限数量的探孔进行直流电法超前物探工作,以评价掘进前方的水文地质情况。

8.3.1 方法原理

钻孔超前探技术就是利用掘进头的钻孔进行矿井直流电法勘探,是矿井直流电法应用的拓展。其特别之处在于电极系一部分被放置在水平探孔中,如图 8-3-1 所示。

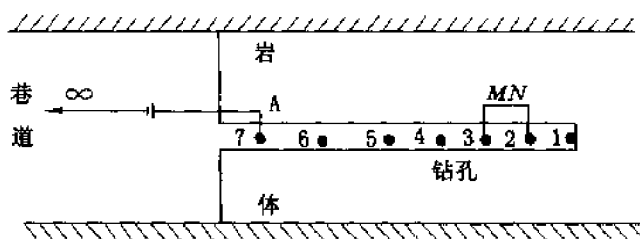


图 8-3-1 巷道钻孔超前探电极布置示意图

8.3.2 掘进头钻孔超前探技术

近水平孔内布置电极不同于在平地上,具有特殊性:电极与孔壁间的接触电阻问题;孔内电极移动不方便问题。针对这两个特殊问题,笔者在实践中设计了一套方案,即设计了专用的电极,如图 8-3-2 所示。首先,电极主体采用微带弧度的钢板,弧度大小根据钻杆确定,长度在 15 cm 左右,在钢板的中央固定上宽 2 cm 左右的弹簧片。其次,采用钻杆固定电极法,在钻杆相应位置缠绕几层绝缘胶布以减少钻杆的影响,然后把电极固定在钻杆上,把所有电极均匀固定在钻杆的相应位置,并且每个电极引出一条导线。具体施工时,布置电极前先用钻杆通孔,然后用钻杆将电极送到孔中,为了减少接触电阻,还可以在电极上缠布浇盐水或向孔内灌盐水。

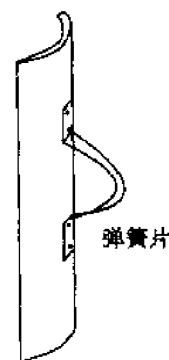


图 8-3-2 专用电极示意图

巷道掘进头钻孔超前探可以采取三极装置或两极装置进行测量,具体施工方法可采用剖面法也可采用测深法。

巷道掘进头钻孔超前探地电响应特征的数值模拟结果如图 8-3-3 所示。正演计算所选用的地电模型如图 8-3-4 所示,异常体大小为短轴 15 m、长轴 40 m 的椭球体,电阻率 $5 \Omega \cdot \text{m}$,围岩电阻率 $50 \Omega \cdot \text{m}$,钻孔穿过异常体。

由图 8-3-3 可以看出,异常体位于水平位置 25~35 m 范围内,深度大约在 30 m 左右范围内,异常体开口向上,说明这个异常是贯通巷道所在平面的,这个结果是全空间场条件下的综合反映。

某矿新风井水平联络巷掘进过程中曾发生突水事故,后采用注浆堵漏、强排水措施恢复井下系统。恢复掘进施工前采用钻孔超前探技术,旨在查清前方是否还存在含水层。根据地质任务的要求,实际施工时采用三极电测深方法,实测视电阻率断面图如图 8-3-5 所示。图中横轴为点的水平位置,0 位置为掘进头位置,负值表示位于未掘进岩层中,正值表示位于巷道中,纵轴为视深度。

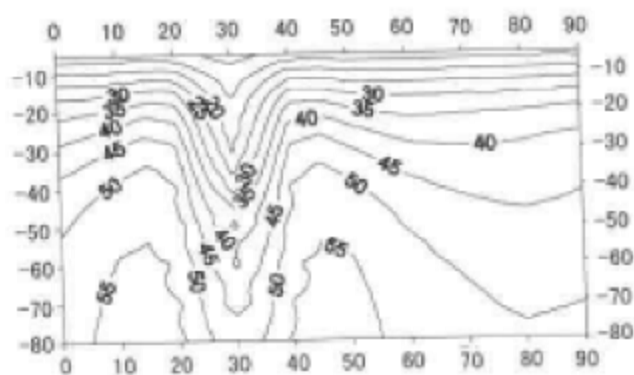


图 8-3-3 正演视电阻率断面图

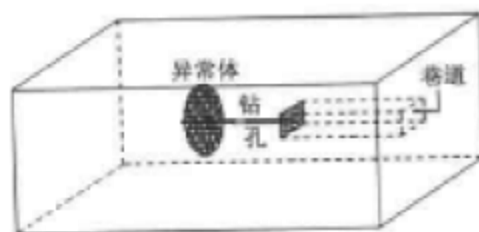


图 8-3-4 地电模型示意图

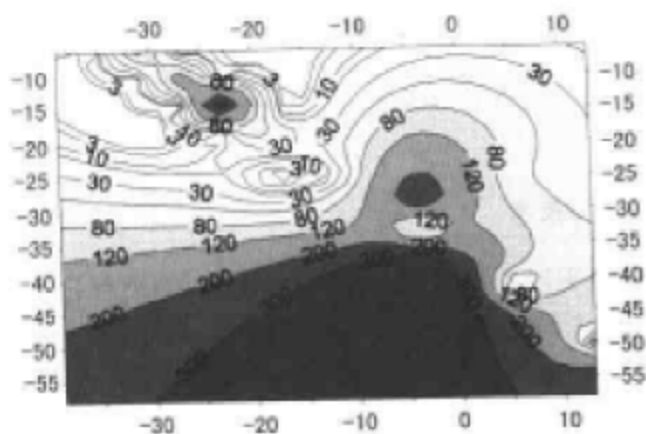


图 8-3-5 实测钻孔超前探视电阻率断面图

根据视电阻率断面图分析,在-39~-10 m、垂向 25 m 范围内岩层破碎,弱含水,围岩完整,无导水通道,不影响巷道掘进安全。后被掘进揭露结果证实,说明该方法在超前探测含水构造方面有其应用价值。

值得说明的是,本章所探讨的三种水文物探方法或技术尚不成熟,有许多问题有待进一步研究和解决。这里就三维分布式电阻率成像系统,井一地三维电法勘探和掘进头钻孔超前探技术进行了简单探讨,一方面是为了展示煤矿水文物探技术的最新进展,另一方面是想说明煤矿工作环境复杂多样,如何因地制宜、创造性地开展物探工作,是煤矿防治水工作中能否充分发挥物探作用的关键。愿各位同行在以后的工作中继续探索和研究。

参考文献

- [1] 赵全福. 中国煤矿防治水技术经验汇编. 北京:煤炭工业出版社,1998
- [2] 中国统配煤矿总公司生产局,煤炭科技情报研究所. 煤矿水害事故典型案例汇编,徐州:中国矿业大学出版社,1992
- [3] 王永红,沈文. 中国煤矿水害预防及治理. 北京:煤炭工业出版社,1996
- [4] 钱鸣高,缪协兴,许家林,等. 岩层控制的关键层理论. 徐州:中国矿业大学出版社,2000
- [5] 王作宇,刘鸿泉. 承压水上采煤. 北京:煤炭工业出版社,1993
- [6] 施龙青,韩进. 底板突水机理及预测预报. 徐州:中国矿业大学出版社,2004
- [7] 李志鹏. 煤田电法勘探. 徐州:中国矿业大学出版社,1990
- [8] 李金铭,罗延钟. 电法勘探新进展. 北京:地质出版社,1996
- [9] 中国煤田地质总局. 中国煤田电法勘探典型成果图集. 北京:煤炭工业出版社,2000
- [10] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探. 北京:地质出版社,1998
- [11] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用. 西安:陕西科学技术出版社,2002
- [12] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用. 北京:科学出版社,1999
- [13] 严俊良,胡文宝,杨绍芳,等. 电磁勘探方法及其在南方碳酸盐岩地区的应用. 北京:石油工业出版社,2001
- [14] 李志鹏,刘树才,岳建华. 煤田电法勘探数字解释基础. 北京:煤炭工业出版社,1995
- [15] 陈仲侯,王兴泰,杜世汉. 工程与环境物探教程. 北京:地质出版社,1993
- [16] 王兴泰,万明浩. 工程与环境物探新方法新技术. 北京:地质出版社,1996
- [17] 崔霖沛,吴其斌. 环境地球物理方法及其应用. 北京:地质出版社,1997
- [18] 霍全明,王玉海,罗国平,等. 瞬变电磁法在煤矿水害预测防治中的应用. 西安:西北工业大学出版社,1994
- [19] 张守恩,葛宝堂. 水文及工程地球物理勘探. 徐州:中国矿业大学出版社,1997
- [20] 王怀洪,王秀东,崔若飞. 山东煤矿采区物探综合物探方法研究. 徐州:中国矿业大学出版社,2003
- [21] 张爱敏. 采区高分辨率三维地震勘探. 徐州:中国矿业大学出版社,1997
- [22] 崔若飞. 地震资料矿井构造解释方法及其应用. 北京:煤炭工业出版社,1997
- [23] 刘天放,李志鹏. 矿井地球物理勘探. 北京:煤炭工业出版社,1993
- [24] 储绍良. 矿井物探应用. 北京:煤炭工业出版社,1996
- [25] 岳建华,刘树才. 矿井直流电法勘探. 徐州:中国矿业大学出版社,2000

- [26] 李竞生. 华北型煤田水害防治技术进展. 煤炭学报, 1997, 22(增刊): 98~99
- [27] 康永华. 采煤方法变革对导水裂缝带发育规律的影响. 煤炭学报, 1998, 23(3): 262~342
- [28] 陈钢林, 周仁德. 水对受力岩石变形破坏宏观力学效应的实验研究. 地球物理学报, 1991, 34(3): 335~342
- [29] 车用太, 杨会年, 宋瑞抑, 等. 不同温压条件下饱水砂岩的变形破坏与孔隙压力问题的试验研究. 中国地震, 1989, 5(1): 91~95
- [30] 缪奋. 跨世纪的煤矿勘探技术. 煤田地质与勘探, 1995, 23(4): 49~53
- [31] 李金铭. 电法勘探方法发展概况. 物探与化探, 1996, 20(4): 250~258
- [32] 吴海成, 张连, 李惠民, 等. 水文物探技术的发展和运用. 水文地质工程地质, 1998, (2): 56~59
- [33] 刘树才, 刘志新, 姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 414~417
- [34] 刘树才, 岳建华, 刘江. 西部保水开采中的水文电法勘探技术. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 187~189
- [35] 李貅, 郭文波, 李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 35~38
- [36] 黄力军, 陆桂福, 刘瑞德. 电性源瞬变电磁法在煤田水文地质调查中的应用. 工程地球物理学报, 2004, 1(2): 174~177
- [37] 吴璐苹, 石昆法, 李荫槐, 等. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712~717
- [38] 底青云, 王妙月, 石昆法, 等. 高分辨 V6 系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究. 地球物理学报, 2002, 45(5): 744~748
- [39] 伍岳. EH4 电磁成像系统在砂岩地区勘查地下水的应用研究. 物探与化探, 1999, 23(5): 335~336
- [40] 倪新辉, 刘天放. 地震勘探技术预测奥灰岩溶裂隙发育带. 中国煤田地质, 1997, 9(4): 59~61
- [41] 倪新辉, 刘玉珠, 高建文, 等. 地震勘探技术在煤矿水害防治中的应用. 中国煤田地质, 1999, 11(增): 70~73
- [42] 居兴华. 利用地震资料提取物性参数进行奥灰岩溶水流体预测. 中国煤田地质, 1998, 10(2): 48~53
- [43] 杨道庆, 接铭训. 地震目标勘探实现奥灰水研究的可能性. 煤炭学报, 2002, 27(1): 36~40
- [44] 高生. 用三维地震法进行水源勘探. 河北煤炭, 2001, (3): 50~51
- [45] 张聪玲, 崔若飞. 地震属性技术在奥灰裂隙发育带预测中的应用初探. 煤田地质与勘探, 2004, 32(2): 51~53
- [46] 张爱敏, 丁在宇, 罗振丽. 三维地震在绿色开采中的作用和发展. 中国矿业大学学报, 2004, 33(2): 229~232
- [47] 张聪玲, 崔若飞, 朱银凤. 应用小波变换与二维分形技术预测奥灰裂隙发育带. 中

- 国煤田地质, 2004, 16(1): 41~43
- [48] 许永忠, 张爱敏, 周明, 等. 深部开采地应力异常及陷落柱最小走时层析成像研究. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5): 575~578
- [49] 陶冬琴, 韩德品. 防爆数字直流电法仪及其应用. 煤田地质与勘探, 1994, 22(1): 54~56
- [50] 王永胜, 曾方禄, 张小鹤, 等. 防爆低频电法透视仪. 煤田地质与勘探, 1997, 25(5): 35~37
- [51] Кояч Г И 等著. 苏联煤矿井下电法勘探. 左德坤译. 国外煤田地质, 1989, (6): 39~45
- [52] Дзис И Д. 利用点源场梯度剖面法预测煤层中的断层. 左德坤译. 国外煤田地质, 1988, (1): 48~49
- [53] Чирка Д В, Скворцов А Ф. 西顿涅茨煤田一些煤矿中突水预报的地球物理方法. 左德坤译. 国外煤田地质, 1986, (2): 71~72
- [54] Под редакцией 等. Электроразведка Методом Сопротивлений. Издательство Московского университета. 1994
- [55] Грачев А А. 利用电法勘探预测煤矿区地球动力现象的可能性. 卢冰译. Отечествен. геол, 1995, (12): 46~50
- [56] Csokás J, Dobroka M, Gyulai A. Geoelectric determination of quality changes and tectonic disturbances in coal deposits. Geophys, Prosp, 1986, (34): 1067~1081
- [57] Breitzkt M, Dresen L, Csokás J, Gyulai A. Parameter estimation and fault detection by three-component seismic and geoelectrical surveys in a coal mine. Geophys, Prosp, 1987, (35): 832~863
- [58] Modlin I N, Bolshakov D K, Sapognikov B G. Non-contact resistivity measurements. Report. Presented at Annual EAGE conference, June 1996, Amsterdam, The Netherlands
- [59] Modlin I N, Shevnin V A, Pervago E V. Vector measurements in resistivity prospecting. Report. Presented at Annual EAGE conference, June 1994, Vienna, Austria
- [60] Bolshakov D K, Modin I N, Pervago E V. The new approach to the analysis of the azimuthal resistivity data over anisotropic media. EAGE 59th Conference, Geneva - 1997
- [61] Bolshakov D K, Modin I N, Pervago E V. Separation of anisotropy and inhomogeneity influence by the spectral analysis of azimuthal resistivity diagrams. 3rd Meeting environmental and engineering geophysics. Proceedings. Aarhus, Denmark, 8~11 September 1997
- [62] Modlin I N et al. Electrical prospecting by resistivity method. MSU edition, Moscow, 1994 (In Russian)
- [63] Modin I N, Shevnin V A, Pervago E V et al. Distortions of VES data caused

- by subsurface inhomogeneities. Report, presented at EAEG 56th Annual Meeting, Austria, Vienna, June 6-10, 1994
- [64] Modin I N, Ignatova I D, Pervago E V. Coal layer inhomogeneities investigations by vector resistivity measurements in mines. Report, presented at EAEG 57th Annual Meeting, Glasgo, May 28-June 2, 1995
- [65] Bolshakov D K, Modin I N, Pervago E V et al. Anisotropy effects investigations by resistivity method in some inhomogeneous media. Report, presented at EAEG 57th Annual Meeting, Glasgo, May 28-June 2, 1995
- [66] Pervago E V, Bobachev A A, Modin I N et al. VES field and processing technology for the case of high level geological noise. Report, presented at Annual SAGEEP conference, April 1995, Orlando, Florida, USA
- [67] Sasaki Y, Koichi Matsuo. Surface-to-tunnel resistivity tomography at the Kamaishi mine. BUTSURI-TANSA, 1993,46(2):83~87
- [68] 王为民. 矿井下探测含水、导水构造的物探方法. 煤田地质与勘探, 1996, 24(3):54~55
- [69] 程久龙, 刘宗才. 煤层底板岩层富水性的物探方法评价. 见: 全国矿井水文工程地质学术交流会论文集. 地震出版社, 1992
- [70] 侯克昌. 三极电阻率法探测构造与含水体. 煤田地质与勘探, 1993, 21(4):57~61
- [71] 岳建华, 李志聃. 矿井多极距偶极电剖面法及其应用. 煤田地质与勘探, 1994, 22(3):47~50
- [72] 岳建华, 李志聃. 煤矿井下直流层测深法原理与应用. 煤炭学报, 1994, 19(4):422~429
- [73] 岳建华, 刘树才, 李志聃. 温纳偏置电测深压制表层电性不均匀体影响的研究. 煤田地质与勘探, 1994, 22(6):51~55
- [74] 岳建华, 刘树才, 于景村. 矿井电法井下干扰试验研究. 勘察科学技术, 1994, 72(6):60~62
- [75] 岳建华, 刘树才, 刘志新, 等. 巷道直流电测深在探测陷落柱中的应用. 中国矿业大学学报, 2003, 32(5):479~481
- [76] 于景村, 李志聃. 高分辨率三极电测深法探测煤矿突水构造. 煤田地质与勘探, 1997, (25):38~39
- [77] 韩德品. 水平钻孔中电阻率法测煤厚的原理及正演模拟. 煤田地质与勘探, 1996, 24(6):54~55
- [78] 韩德品, 张天敏, 石亚丁, 等. 井下单极—偶极直流电透视原理及解释方法. 煤田地质与勘探, 1997, 25(5):32~34
- [79] 侯克昌. 三极电阻率法探测构造及含水体. 煤田地质与勘探, 1993, 21(4):57~61
- [80] 程久龙, 王玉和, 于师建, 等. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用. 煤田地质与勘探, 2000, 28(4):60~62