

第五章 高频大地电磁在不同类型金属矿床勘查中的应用

5.1 高频大地电磁在广西资源县铀资源前景评估的应用

5.1.1 广西资源县芥菜坪地区地质、物性特征

一、区域地质背景

<1>、大地构造背景

工作区地处华南扬子陆块江南地块南缘苗儿山—越城岭花岗岩穹窿构造西翼的苗儿山中段。江南地块以具四堡—晋宁期、加里东期双层褶皱基底为特征，其南东侧为南华活动带构造区。自元古代以来，苗儿山—越城岭花岗岩穹窿构造区经历了复杂的地质构造与成矿作用演化发展，是一个热液铀—多金属及非金属矿集区。

<2>、地层

苗儿山—越城岭地区现可见最老的地层为出露于穹窿核部边缘上元古界青白口系丹洲群。由云场里、架枧田、岩门寨三个组构成，为一套火山复理石建造。其中云场里组为一套由变流纹岩、石英角斑岩、拉斑玄武岩与碳质板岩、钙质板岩等组成韵律层序的地层，厚620m。区内丹洲群未见底，其厚度大于2860m。上元古界南华系包含长安、富禄、大塘坡、南沱等四个组，厚度超过2000m，该层为冰期、间冰期地层。其底部长安组为中厚层变质含砾砂岩夹变质含砾凝灰质长石、石英砂岩。其砾石成分以长石、石英为主，次为板岩屑、花岗岩及中酸性喷出岩屑等。富禄组、大塘坡组为重要的含铁岩系，有多层赤铁矿—磁铁矿层，铁矿最大厚度达160m。南沱组为冰碛砾岩。该地层可见到花岗岩砾石，提示区内有近源前南华纪(>800Ma)花岗岩的存在。

震旦系—寒武系—奥陶系为连续沉积，总厚达3000 m，为一套发育在拉张、断裂热沉降动力背景的上扬子东南被动大陆边缘盆地碳硅泥岩建造。该套地层铀元素背景值高。特别是震旦系上统牛蹄塘组、寒武系下统清溪组黑色岩系，平均铀含量分别为 10.6×10^{-6} 和 25.6×10^{-6} 。

中泥盆统一二叠统，区内已属湘桂克拉通边缘盆地，为一套新的碳硅泥岩沉积。

白垩纪红盆沉积地层，区内称崑山组，主要分布在苗儿山、越城岭隆起间NNE向狭长盆地中，而块断上升的山原面上，仅有零星残留。为一套紫红色以近源快速堆积的陆棚山麓及河流碎屑岩沉积。现存厚度200~2000m。

区内缺失志留系及下泥盆统、下二叠统、中—上三叠统、侏罗系、第三系等地层。

〈3〉、区域构造特征

项目工作区为花岗岩区，该区发育了四堡—晋宁、加里东—海西、印支、燕山—喜山不同时期花岗岩。花岗岩在空间上成层套叠，依次产出。岩浆作用时间长，阶段多，演化充分，主要为区内陆壳原地重熔所致，为铀矿床形成提供了丰富的物质来源。区内的断裂构造系统，对于热液铀矿形成至关重要。从遥感图象上看，最醒目的线性构造为纵贯岩体的NNE向断裂构造，自西向东，主要有兰蓉断裂带、麻林—香草坪断裂带、新宁—资源断裂带、紫花坪断裂带等。这组断裂规模大，均向西倾斜，切过燕山期花岗岩体或红盆，具脆—韧性剪切特征。这组断裂控制了资源铀矿田的成矿。韧性剪切带的发育与区内的四堡—晋宁（雪峰）期、加里东—海西期、印支期造山—重熔花岗岩作用有关，如新资断裂下盘韧性剪切带可分为糜棱片岩、糜棱片麻岩、初糜棱钾长花岗岩、弱片麻状花岗岩等5个亚带，构造作用时期为 208 ± 24 Ma，与区内舜皇山超单元花岗岩同期，为印支期产物，而在燕山—喜山期抬升至地壳浅部，且被复活。燕山—喜山期断裂活动具有脆—韧性变形特征，其它剪切带也具有类似特征。该类断裂深度大，连通了深部成矿流体的运动，从区域上控制了成矿作用的发生。工作区内热液铀矿系统中的成矿物质、成矿流体、能量场、中介场及矿体赋存位置等多种要素特征均反应到控矿构造网络特征上。蚀变带沿断裂构造发育，铀矿体产于花岗岩断裂构造第一蚀变带中。矿体产状严格受到断裂构造控制。根据区内铀矿成矿特点，隐伏的构造—热液蚀变脉型铀矿是项目主要找矿评价目标类型。因此，对区内多级控矿构造（剪切断裂—蚀变带、花岗岩层接触界面等）的研究是关键。

〈4〉、主要的地层岩性和物性参数

印支期（香草坪单元、豆乍山单元）花岗岩和燕山期花岗岩是测区的主要岩性，主要的地层岩性和物性参数见表5-1和表5-2。

表 5-1 印支期舜皇山超单元花岗岩地层岩性及物性参数表

地质年代		超单元	单元	代号	岩性	电阻率(Ωm)
世	分界年龄(Ma)					
晚三叠世	205	舜皇山超单元	张家单元	T ₃ Zh	细中粒黑云母(云母)花岗岩	n*100~n*1000
			小木桶单元	T ₃ XM	中粒电气石白云母花岗岩	n*100~n*1000
			邓家单元	T ₃ D	细、中细粒黑云母长花岗岩	n*100~n*1000
			冷家岭单元	T ₃ L	细粒斑状黑云母长花岗岩	n*100~n*1000
			狮子山单元	T ₃ SHz	中粒黑云母长花岗岩	n*100~n*1000
			上水槽园单元	T ₃ Sh	中粗粒斑状黑云母花岗岩	n*100~n*1000
			竹山湾单元	T ₃ ZhS	中粗粒黑云母长花岗岩	n*100~n*1000
中三叠世	241	超单元	光卧岭单元	T ₃ G	中粒黑云母长花岗岩	n*100~n*1000
			豆丁山单元	T ₃ DZ	中粒云母长花岗岩	n*100~n*1000
			香草坪单元	T ₂ X	中-中粗粒黑云母二长花岗岩	n*100~n*1000

表 5-2 燕山期花岗岩谱系单位划分表

地 质 年 代			超单元 名称	单元名称	代号	主体岩性	电阻率 (Ωm)
纪	世	Ma					
白 垩 纪	早白垩世	96	紫花坪		$\lambda \pi$	石英斑岩	n*100~n*1000
					K ₁ XT	细粒白云母二长花岗岩	n*100~n*1000
侏 罗 纪	晚侏罗世	135		杨家坪	J ₃ Y	细粒黑云母二长花岗岩	n*100~n*1000
				中水槽园	J ₃ Zh	中细粒斑状云母 长花岗岩	n*100~n*1000
				香铺子	J ₃ XP	中细粒斑状黑云母 长花岗岩	n*100~n*1000
	中侏罗世	154	大圳		$\gamma \pi$	花岗斑岩	n*100~n*1000
				彭家岭	J ₂ Pj	中细粒黑云母二长花岗岩	n*100~n*1000
				苦力水	J ₂ k	细粒-微细粒黑云母 长花岗岩	n*100~n*1000
黄沙塘	J ₂ H			细粒斑状黑云母花岗岩	n*100~n*1000		
早侏罗世	205	五团	风雨殿	J ₁ F	中细粒斑状黑云母 花岗岩	n*100~n*1000	
			江家	J ₁ J	中粒斑状黑云母 长花岗岩	n*100~n*1000	
			平水江	J ₁ P	中粗粒斑状黑云母 长花岗岩	n*100~n*1000	
			坪头山	J ₁ PT	中粗粒黑云母花岗岩	n*100~n*1000	

5.1.2 野外工作方法技术

<1>、场源选择

EH-4 通常采用天然场源,只有在天然场信号很弱或者根本没有信号的频点上,才使用人工场源,用以改善数据质量,提高数据信噪比。由于工作区位于远离城市的山区外界工业干扰程度较弱,故采用天然场源。

<2>、频率选择

EH-4 电导率成像系统可以在 0.1 Hz 至 100 KHz 的宽频范围内采集数据,为确保数据质量与工作实效,采集分频段进行,上述频带又分成四个频组:

一频组: 0.1Hz—1KHz

二频组: 10Hz—1KHz

三频组: 300Hz—3KHz

四频组: 1.5KHz—99KHz

具体观测中使用哪几个频率组,可视情况灵活掌握。在野外能实时获得的 H_x 、 E_x 、 H_z 、 E_z 振幅, ΦH_x 、 ΦE_x 、 ΦH_z 、 ΦE_z 相位,一维 BOSTICK 反演和二维电阻率成像结果。在室内数据处理后,可获得二维正、反演结果等。

本项目工作区基岩多为花岗岩,其电阻率为 $500 \Omega \cdot m \sim 1000 \Omega \cdot m$ 。探测时取最低工作频率为 10 Hz,花岗岩电阻率取 $2500 \Omega \cdot m$,深度大于 1000 m,满足设计要求。故本次工作频率取二、三、四三个频组工作,频率范围 10Hz~99 KHz。

<3>、观测点的布置:芥菜坪及大坪里两测区的物探剖面线的位置布设,及物探剖面测量工作由甲方负责。测点定位采是用森林罗盘仪指示方向,用皮尺测量距离,手持式 GPS 定位,进行地形改正,要求点位绝对误差小于 0.5m,方位角偏差小于 0.2° 。

<4>、在开展工作的前一天进行了平行试验工作,要求两个磁棒相隔 2~3m,平行放在地面,两个电偶极子也要平行,与磁棒垂直布设。观测与分析电场、磁场通道的时间序列信号,以检测仪器是否工作正常。

<5>、电极的布置技术:如图 5-1 所示,本次工作共用四个电极,每两个电极组成一个电偶极子,与测线方向一致的电偶极子叫做 X-Dipole;与测线方向垂直的电偶极子叫做 Y-Dipole。为了保证 Y-Dipole 电偶极子的方向与 X-Dipole 的相互垂直,用罗盘仪确定方向,误差 $\leq \pm 0.5^\circ$;电偶极子的长度用测绳测量,绝对误差在 $< \pm 0.5$ 米。

<6>、磁棒布置技术:磁棒离前置放大器应大于 5m,为了消除人文干扰两个磁

棒要埋在地下至少 5cm，用地质罗盘定方向使其相互垂直，误差控制在 $<\pm 2^\circ$ ，且水平。要求所有的工作人员要离开磁棒至少 10m，尽量选择远离房屋、电缆、大树的地方布置磁棒。

<7>、AFE(前置放大器)布置技术：将电、磁道前置放大器放在测量点上，即两个电偶极子的中心，为了保护电、磁道前置放大器，应首先接地，并远离磁棒至少 10m。

<8>、主机布置技术：主机要求放置在远离 AFE(前置放大器)至少 20m 的一个平台上，而且操作员最好能看到 AFE 和磁棒的布置。

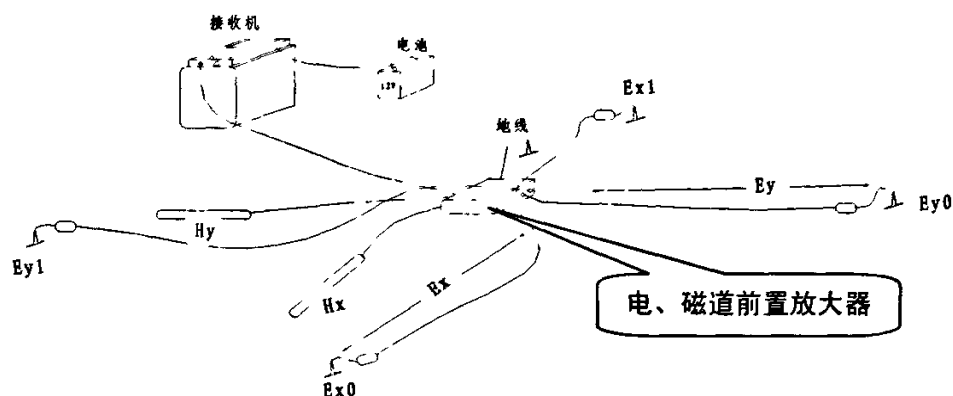


图 5-1 数据采集系统连接图

5.1.3 应用效果分析

广西资源县铀矿前景评估主要是查明测区内的隐伏断层，破碎带及不同时期的花岗岩的接触带等构造体系的分布及延深情况，以便指导成矿预测工作。根据以往的资料可知，完整的花岗岩体的电阻率值可达 $n \times 10^4 \Omega \cdot m$ ，而破碎带或断层由于含水等因素其电阻率为 $n \times 10 \sim n \times 10^2 \Omega \cdot m$ ，两者相差 10 倍，达一个数量级，而热液蚀变带由于所含金属硫化物、金属氧化物等电子导体，其电阻率较花岗岩体的电阻率低得多，因此分析电阻率差异，是对电测深结果作出地质解释的。图 5-2 为广西资源县芥菜坪测区高频大地电磁测深剖面布置图，其中红色条带状为已知的构造矿化带，I 号剖面是四条剖面中最长的一条，也是最重要的一条，该剖面长 910 m，点距 10 m，测点 92 个，从已知的地质资料中可以知道该剖面穿过五条构造矿化带，在二维反演视电阻率拟断面图中均有所反应，其中 F1 断层在地表位置位于

30~40 号测点之间该断层向下延深 800 多米，产状近似直立，为深部大断层，在该断层的浅部、中部及深部有多处低阻局部异常。在该位置的向北一百米处为该构造带的正开采的矿体。

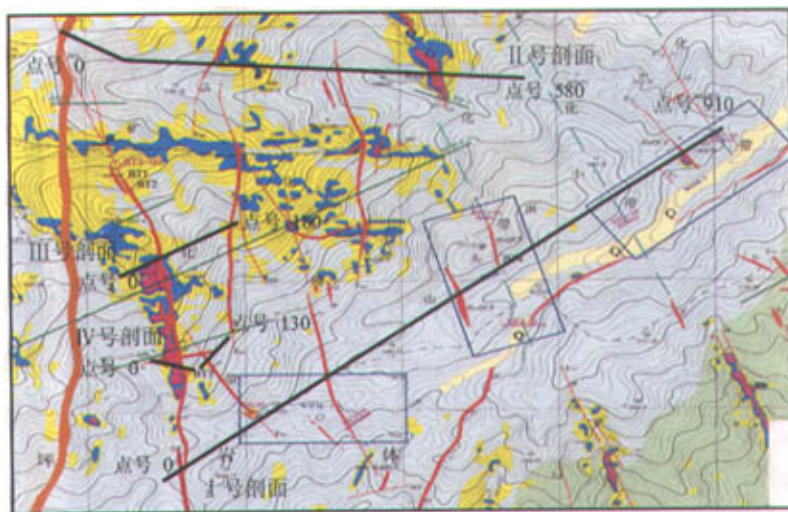


图 5-2 广西资源县××测区高频大地电磁测深剖面布置图

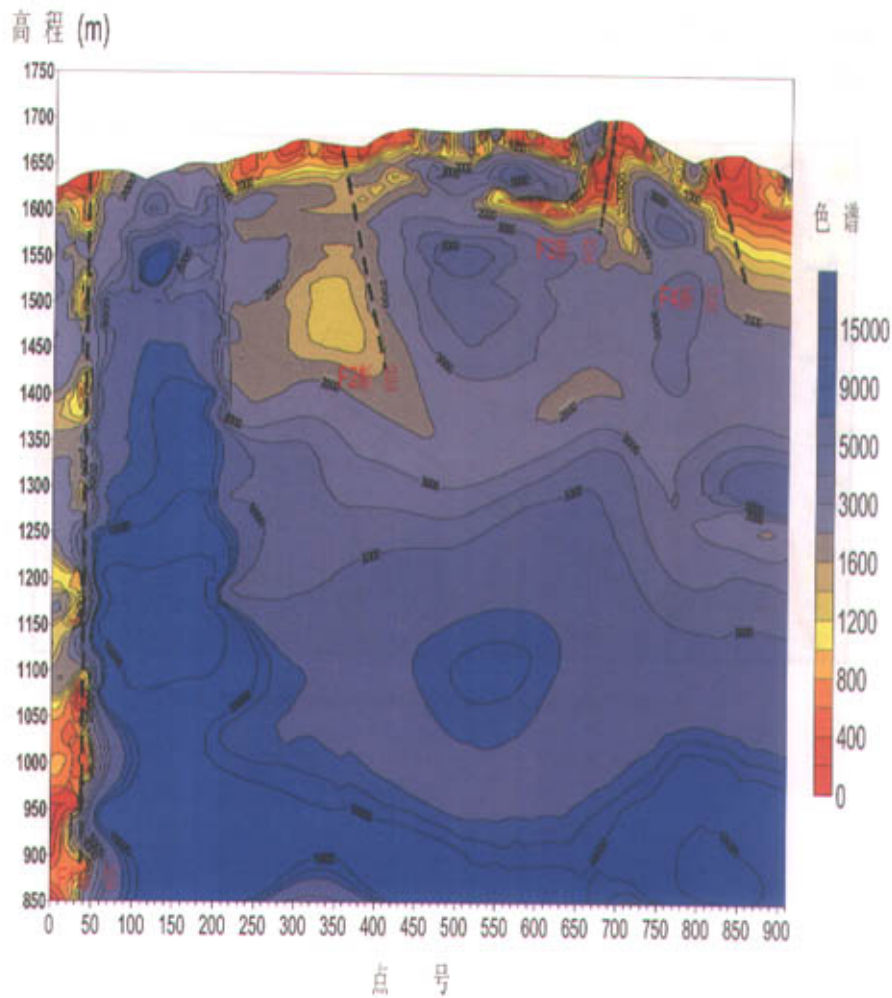


图 5-3 广西资源县芥菜坪测区 I 号剖面视电阻率二维反演拟断面图

从图 5-3 中可以看出 F2 断层异常带较宽，结合地质资料分析它应该是两个构造矿化带的综合反映，如何能把它们区分出来关键是提高横向（水平）分辨率，横向或水平分辨率主要与电场偶极的大小有关。有关数值模拟表明，TM 方式的横向分辨率大致等于电场偶极距。电场偶极距小自然能探测到更小的目标体。深部的横向分辨率是测量偶极长度与频率的函数。在低频段，相当于波长增大，相应地探测范围扩大，分辨率降低。I 号剖面是采用 10m 偶极距，在实际工作中已经难再减小偶极距，可以在二维中反演中减小圆滑因子以突出局部小异常来达到目的，图 5-4 为用较小圆滑因子反演的结果，从图可以看出 F2 断层分为 F2 和 F2-1 两个断层。

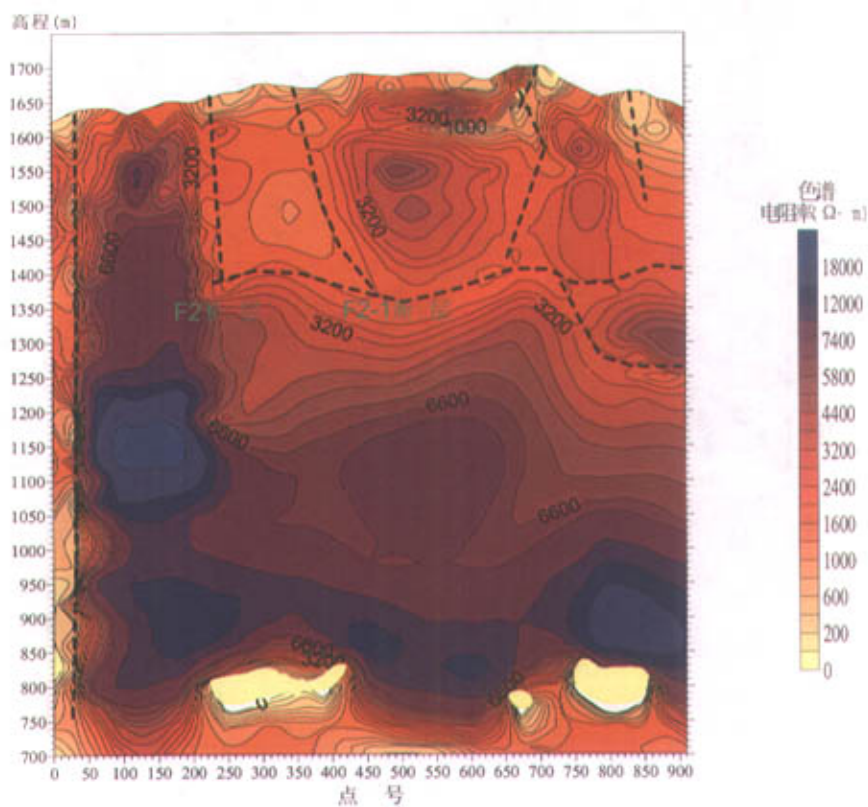


图 5-4 广西资源县芥菜坪 I 号剖面小圆滑因子视电阻率二维反演拟断面图

图 5-5 和图 5-6 分别为同一个地质剖面上两个不同偶极距的反演结果，从图中可以看出较小的电场偶极距能探测到更小的目标体。也就是有着较高横向（水平）分辨率。

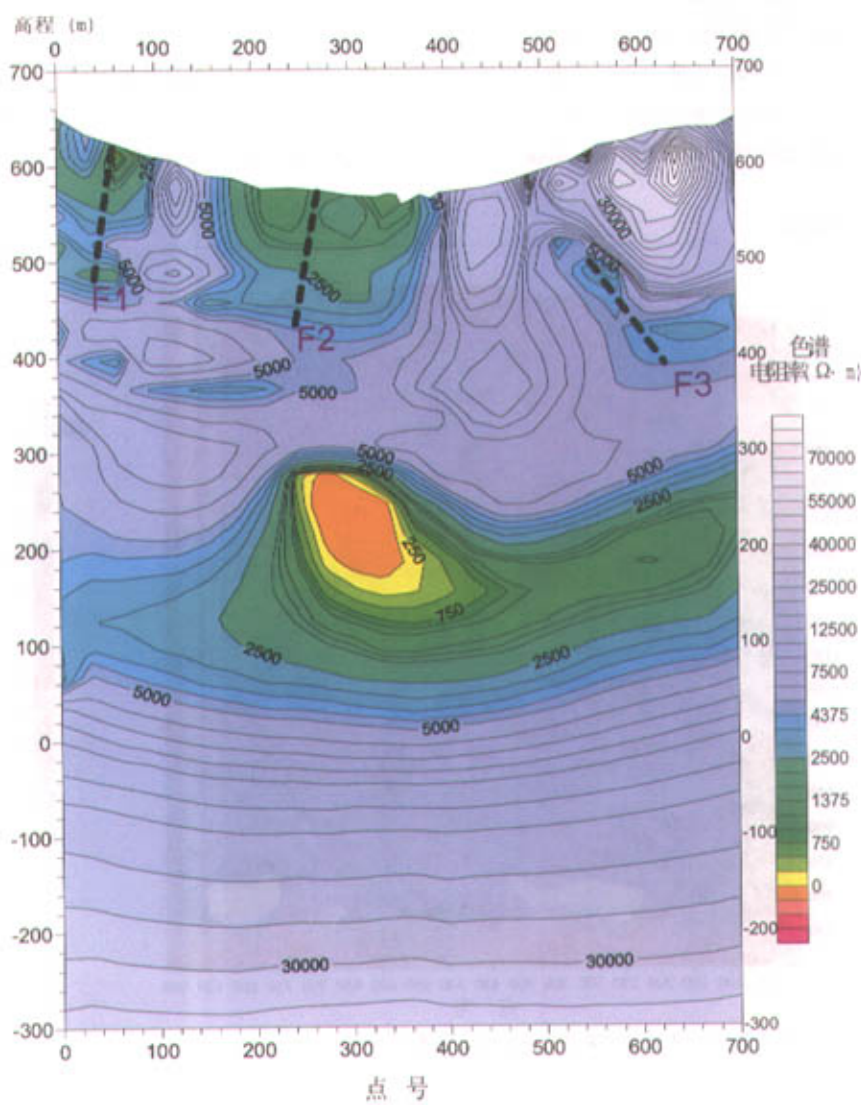


图 5-5 山东文登县某测区 1 号测线视电阻率二维反演拟断面图（40 米偶极距）

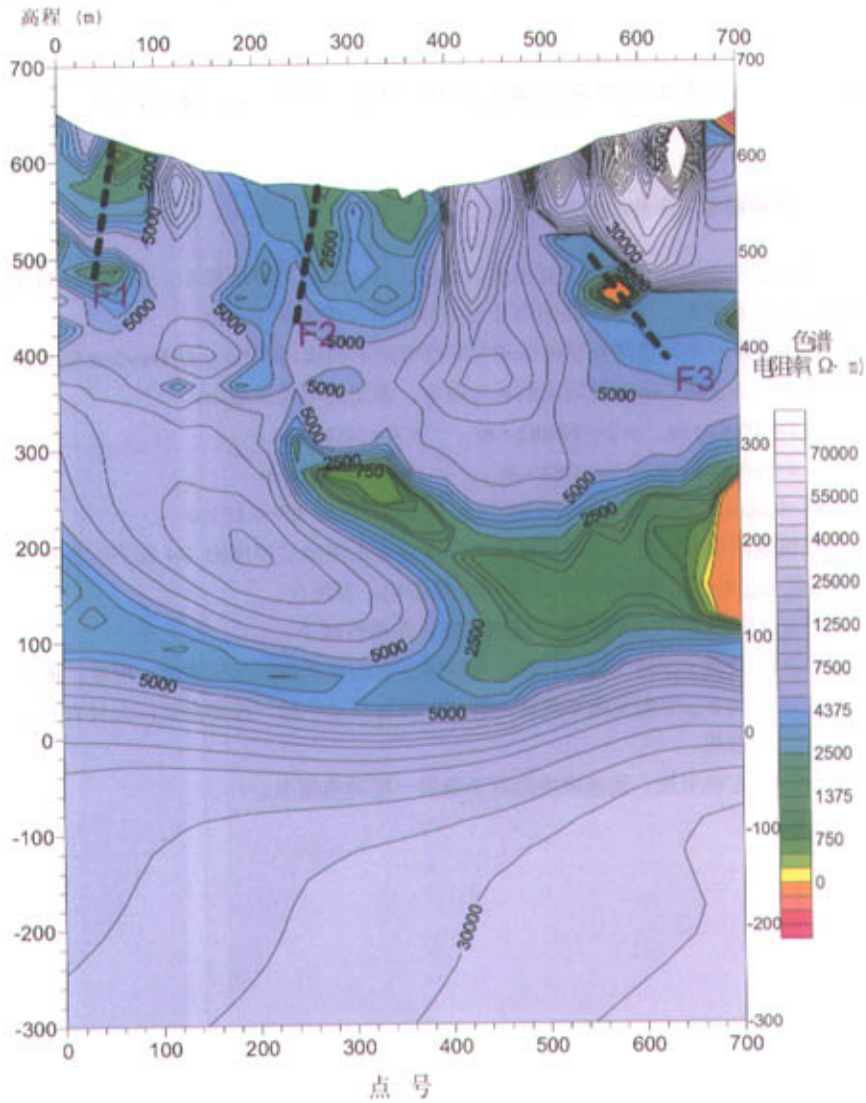


图 5-6 山东文登县某测区 1 号测线视电阻率二维反演拟断面图 (20 米偶极距)

以上实例说明高频大地电磁测深(EH-4), 能对各种断层均有明显的异常反应, 在实际工作中, 如果经济条件允许的情况下, 用较小的电场偶极能达到更好探测效果。

5.2 Basokur 视电阻率在高频大地电磁中识别薄互层矿体的应用

5.2.1 两种视电阻率曲线的正演比较

薄互层是指高阻、低阻交互出现的地层。由于地层的厚度较小, 各种方法对这种地层都很难把握, 因而提高对薄互层的分辨率有重要实用价值。

图 5-7 为一个六层薄互层地电模型的视电阻率曲线, 其中 ρ_{af} 是 Basokur 定义的视电阻率, ρ_{ac} 是 Cagniard 定义的视电阻率, 各层的电性参数为:

$$\rho_1=100\Omega \cdot m \quad \rho_2=1000\Omega \cdot m \quad \rho_3=10\Omega \cdot m$$

$$\rho_4=1000\Omega \cdot m \quad \rho_5=10\Omega \cdot m \quad \rho_6=1000\Omega \cdot m$$

$$h_1=0.1km \quad h_2=0.1km \quad h_3=0.05 km \quad h_4=0.4 km \quad h_5=0.15 km$$

该模型的第三、五层为低阻薄层, 厚度仅为上覆地层厚度的 1/4 左右。显然曲线 ρ_{af} 比 ρ_{ac} 更好地反映了下伏地层的电性结构, 表现在:

- (1) 左支曲线更趋于第一层电阻率, 振荡性减小。
- (2) 曲线 ρ_{af} 对中间三、四、五层薄互层的反映高低起伏清晰、明显; 而曲线 ρ_{ac} 中则反映不清楚, 将三、四层混在一起, 可能会误以为只有五层曲线。
- (3) 右枝更快、更准确地趋近于最后一层的电阻率。

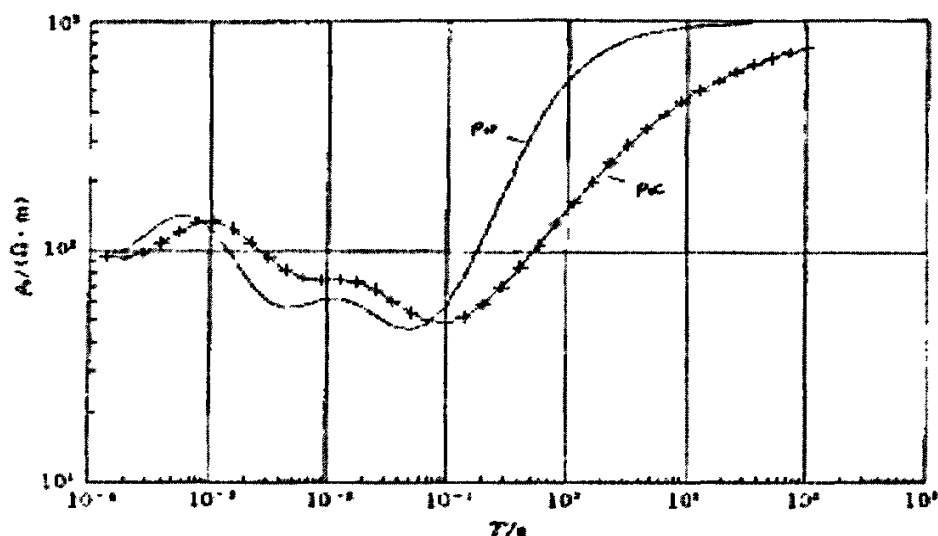


图 5-7 六层模型的视电阻曲线

5.2.2 两种视电阻率在层状矿体的实际应用效果

河南××铝土矿区找矿效果试验是在有详细钻孔资料的地铝土矿区进行的科研合作。其试验的目的是用该方法探测查明地下岩层电性结构,对已获得物探异常结合地质资料作出科学的解释,判定铝土矿与基岩之间的岩性接触带的空间赋存位置及延伸情况,以便指导成矿预测工作。有关资料表明,华北地台铝土矿区地层有如下地质特征:铝土矿下伏基岩为奥陶系灰岩,在铝土矿与奥陶系灰岩之间可能有沉积型铁矿。而铝土矿的上盖岩层分别为上二叠系煤层、上石炭统灰岩、砂岩、粘土岩及第四系黄土。有的矿区可能会缺失一些岩层。有关资料表明,铝土矿区各岩层的电阻率特征由表 5-3 所示

表 5-3 河南省铝土矿区岩层电参数统计表

岩性	奥陶系灰岩	铝土矿	上石炭统灰岩	煤	砂岩	粘土岩
电阻率 ($\Omega \cdot m$)	700~2000	70~100	300~500	60~100	100~200	小于 100
电阻率特征	最大	小	较大	小	中等	较小

从表 5-3 可知奥陶系灰岩与其它岩性电阻差异较大,可达 1~2 个数量级,而铝土矿作为奥陶系灰岩的上盖层,这一物性差异是用高频大地电磁测深进行探测的物

性条件。由于铝土矿是沉积在奥陶（寒武）灰岩的岩溶洼区，因此用高频大地电磁测深如果能解决奥陶（寒武）灰岩的基岩顶面深度及基岩起伏形态，就可以根据矿床的形成特征进行间接找矿，另外有些地方铝土矿的厚度较厚，且与其上覆层的上石炭统灰岩电阻差异较大，如能划分出上石炭统灰岩的界面，则可以初步估计铝土矿的厚度，提高找矿有效果。前人数值模拟资料表明：（1）如果目标层的厚度与其埋深之比大于该层的电阻率与围岩电阻率之比的平方根的 0.2 倍，则目标层就可以分辨出来。（2）如果目标层的厚度与其埋深之比等于或大于 0.2，且与围岩电阻率之比大于或等于 10 以上，则目标层可以分辨出来。一般而言，层状体比起相同埋深二维和三维目标体的会更易分辨。该铝土矿区的铝土矿体属层状体，与下面奥陶系灰岩电阻差异较大，属于较易区分的界面。该铝土矿区与其上覆层的上石炭统灰岩的电阻率差异在 7-8 倍，厚度与埋深之比大于 0.5 以上，属较难区分的界面。图 5-8 为矿区 72 线勘探线地质剖面示意图。

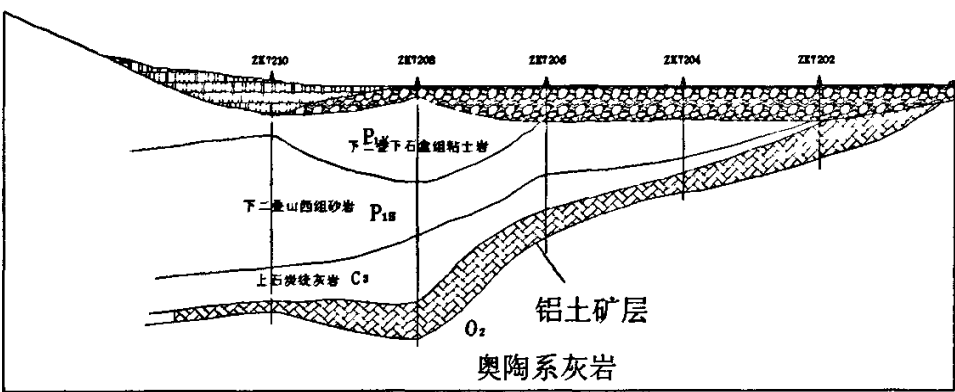


图 5-8 河南 × × 铝土矿 72 线地质剖面示意图

图 5-9 为 Cagniard 视电阻率的二维反演断面图，从图中反应的基岩顶面起伏形态与图 5-8 的实际的钻孔资料基本吻合，但上石炭统灰岩的界面则无法区分，铝土矿的上盖岩层上石炭统灰岩、砂岩、粘土岩及第四系黄土都难于分辨。

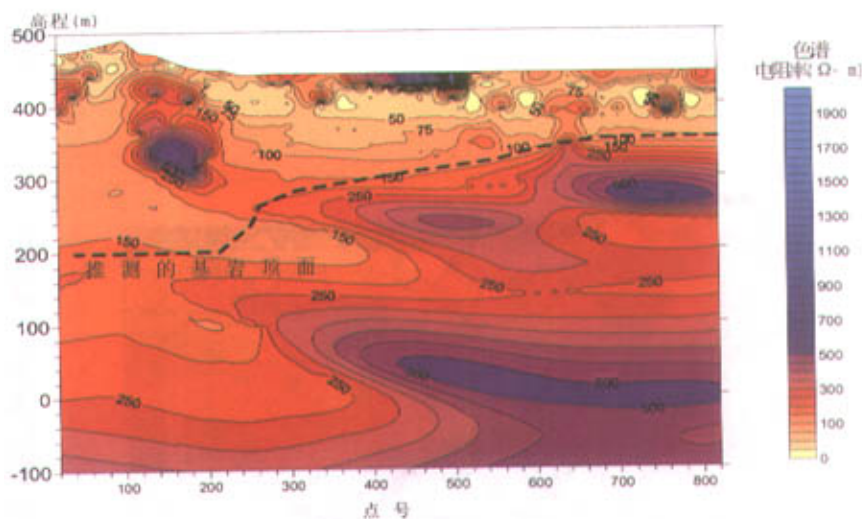


图 5-9 河南××铝土矿 72 线视电阻率二维反演拟断面图

Basokur 定义的视电阻率可由 Cagniard 定义的视电阻率转换而来, 当阻抗虚部 $Y_i \geq 0$ 时, 实际上是相位 $\Phi \geq 45^\circ$ 时, 由式(1-24)有:

$$\rho_{ab} = (Y_r - Y_i)^2 = (2/\omega\mu) \operatorname{Re}^2 Z = 2\rho_{ac} \cos^2 \phi$$

同理, 当 $Y_i < 0$ 时, 即 $\Phi < 45^\circ$ 时, 由式(1-24)有:

$$\rho_{ab} = ((Y_r^2 + Y_i^2)/(Y_r + Y_i))^2 = \rho_{ac}/2\sin^2 \phi$$

ρ_{ab} 考虑了相位的影响, 但当相位趋近于 0 时, 它是不稳定的。

图 5-10 为没有考虑当相位趋近于 0 的影响的二演反演结果,从图中可看出虽然曲线的分层能力有所提高,但有些等值线曲线变化过大,原先为低阻形态的位置变为高阻形态,这主要因为当 Φ 过于小时,转换出来的 ρ_{ab} 会变化过大,有时会导致错误的结果。

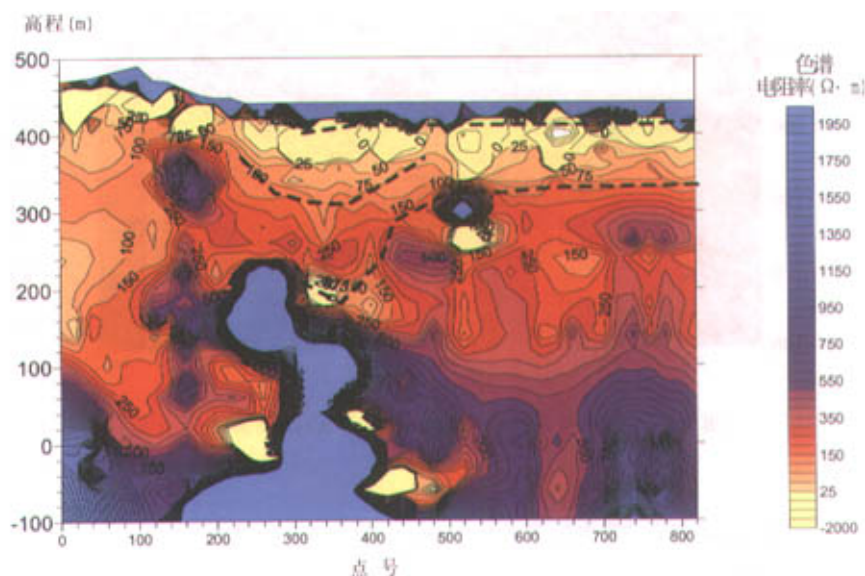


图5-10未考虑相位影响的72线视电阻率二维反演拟断面图

考虑到当相位趋近于0的不稳定的影响,故在进行电阻率转换时采用了折中的方法,对当 $10^\circ \leq \Phi < 45^\circ$ 时 $\rho_{ab} = ((Y_r^2 + Y_i^2)/(Y_r + Y_i))^2 = \rho_{ac}/2\sin^2\phi$ 当 $\Phi \geq 45^\circ$ 时

$\rho_{ab} = (Y_r - Y_i)^2 = (2/\omega\mu)\text{Re}^2 Z = 2\rho_{ac}\cos^2\phi$, 当 $\Phi < 10^\circ$ 不进行转换, 图 5-11 为考虑到当相位趋近于 0 的不稳定的影响进行的反演结果。从图 5-11 可以看出, 奥陶系灰岩基岩顶面起伏形态与实际的钻孔资料更加吻合, 虽然上石炭统灰岩的界面仍无法区分, 但 P_{1x} 层凹口形态已显示出来, 且地表的高阻的卵石层与下面低阻的粘土岩层也显现出来。

通过 Basokur 定义的视电阻率和传统视电阻率在层状矿体的反演结果分析, 表明了新定义的视电阻率参数较之传统的视电阻率在各方面都表现出了更好的性质, 对中间层的分辨能力高, 可有效地提高薄互层反演解释的效果。

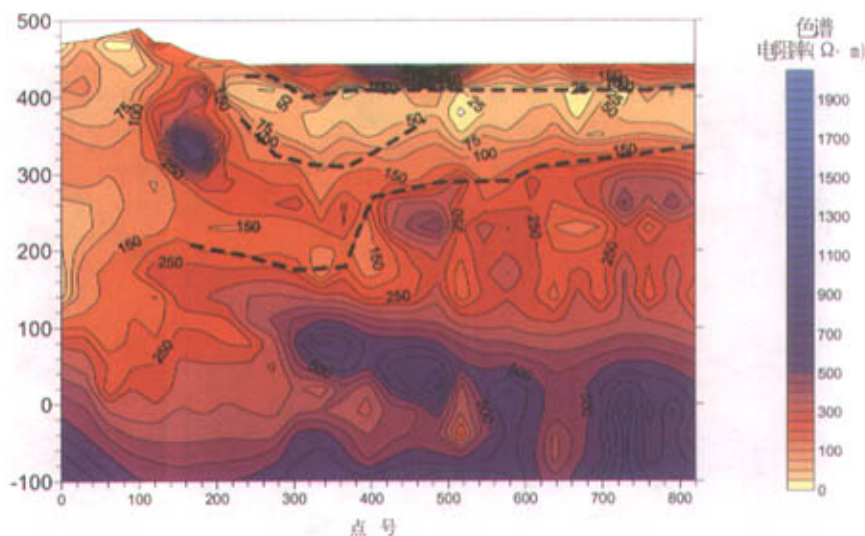


图 5-11 去除低相位影响的 72 线视电阻率二维反演拟断面图

5.3 高频大地电磁测深在深部断裂探测效果研究

河北省灵寿县××金矿找矿效果研究工作目的是判定含金断裂破碎带空间赋存位置和向下延深状态，以便指导深部找矿预测，该矿区地层有如下地质特征：矿区出露地层为太古界阜平群团泊口组变质岩系，以黑云角闪斜长片麻岩为主，夹少量斜长角闪岩，变质程度中—深度。区内侵入岩较发育，矿区西北部有燕山期麻棚岩体，岩性为中酸性石英闪长岩。区内脉岩分布广泛，以石英闪长玢岩为主，见少量煌斑岩脉。矿区内几乎所有的含金石英脉、破碎蚀变带都依附脉岩产出。

区内构造存在两种类型，一是褶皱、二是断裂。燕山期近南北向、北西向断裂构造是区内主要的导矿、容矿构造。根据区内金矿成矿特点，北西或南北向张扭性断裂破碎带是项目主要找矿评价目标类型。

由于金矿体位于石英脉中，就矿石类型而言含金石英脉的导电性应呈高阻反应。本区的石英脉型金矿体几乎都赋存在断裂破碎带内，但由于断裂破碎带的富水性较强，使其呈低电阻反应。根据本矿区的地质特征可知，在断裂破碎上应呈低阻反应。图 5-12 为河北省灵寿县××金矿高频大地电磁 19 号测线布置，该线穿过 101 号破

碎蚀变带，该破碎蚀变带走向 338° ，倾向北东，宽约为 20 米，倾角 70° — 75° ，为主要的含矿带，已知的钻孔资料表明向下延深 430 米仍然为含矿带。



图 5-12 河北省灵寿县 × × 金矿高频大地电磁 19 号测线位置图

图 5-13 为河北省灵寿县 × × 金矿 19 线 TE 二维反演异常解释断面图，从图中可以看出在 260 号测点附近为 101 号破碎蚀变带，与地质资料一致。主要表现是断层带上等值线出现扭曲、电性层的连续性被断开，在断裂破碎带所通过的标高 650m 至标高 350m 范围内，在断层的左右两侧有较大范围的低阻带，说明该处断裂破碎带密集，或者破碎带规模较大。但在向下延深 300 米时，等值线表现为平缓特性，断裂破碎带没有出现向下延深现象，这与地质钻孔资料不相吻，在向下 400m 处，即标高 300m 处，有等值线重新出现扭曲，并向下延深到标高 100 处，在此处有较大范围的低阻带。图 5-14 河北省灵寿县 × × 金矿 19 线 TM 二维反演异常解释断面图，从图中可以看出在标高 500m 处断裂破碎带有更好反映。总的来说，(TE) 的二维反演对浅层的低阻构造更为敏感，但同时却对高阻异常有所压制，垂直极化方式(TM) 的二维反演对深部断裂更为敏感。

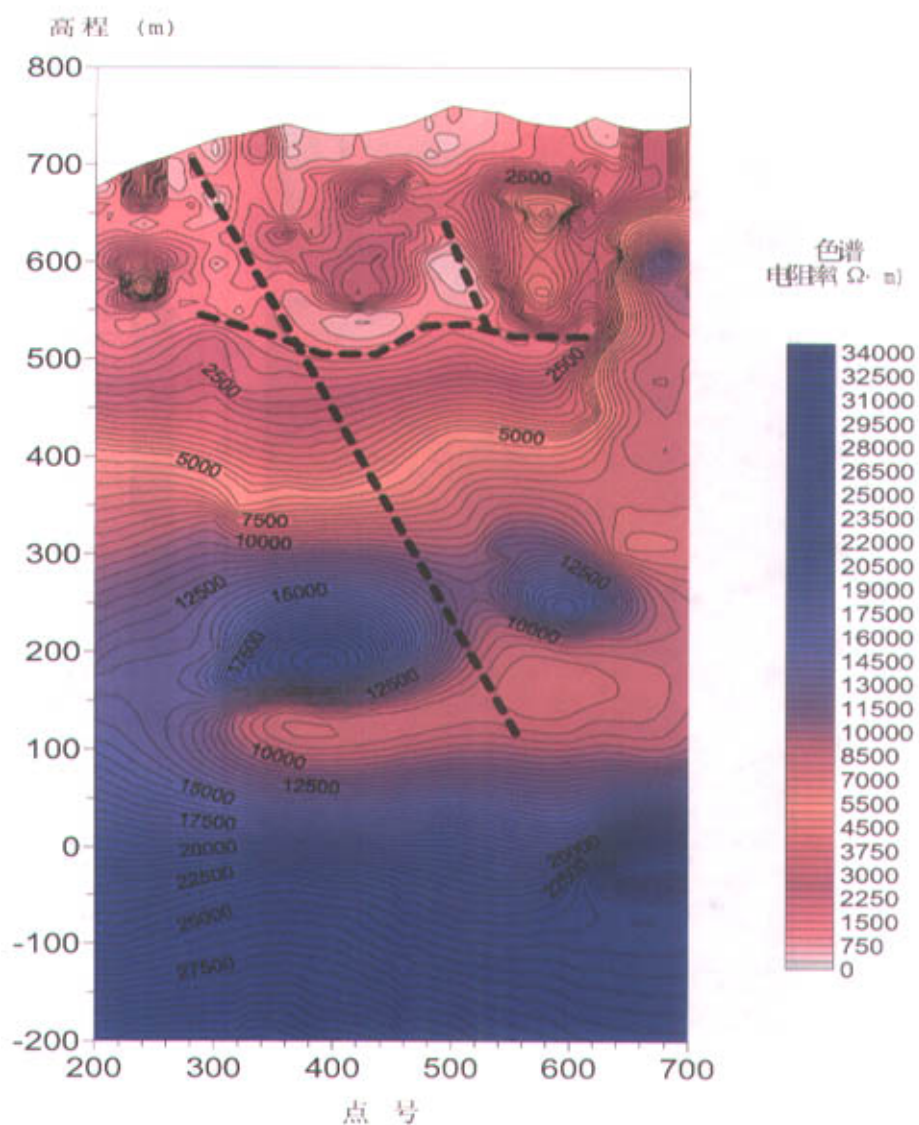


图 5-13 河北省灵寿县 × × 金矿 19 线 TE 视电阻率二维反演拟断面图

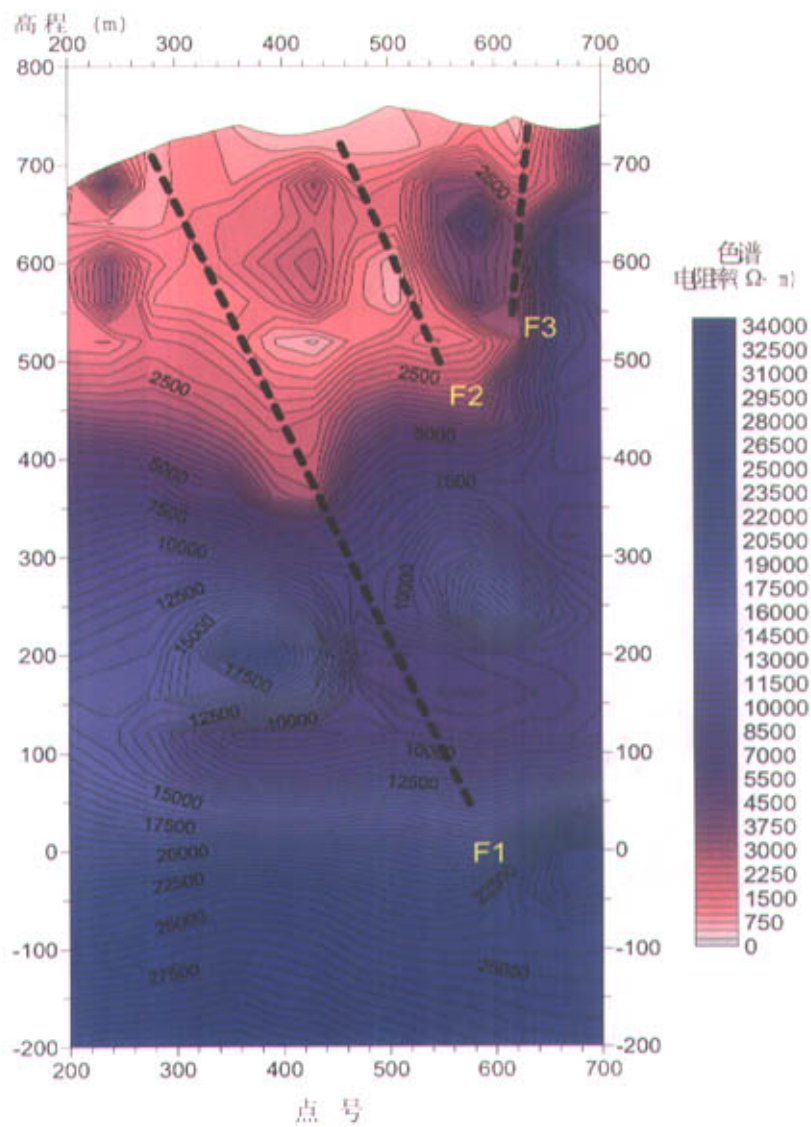


图 5-14 河北省灵寿县××金矿 19 线 TM 视电阻率二维反演拟断面图