# 地球物理勘探在危机矿山深边部接替资源勘探中的应用

柳建新
(中南大学信息物理工程学院　湖南　长沙　410083)

**摘　要**：如何解决危机矿山深边部资源勘探问题，是我国矿业界一个非常紧迫的研究课题，笔者针对危机矿山深边部资源勘探的特殊性和国内外相关研究与应用，详细分析了现有地球物理勘探方法技术及其在危机矿山深边部接替资源勘探的适用，最后结合我国几个大型危机矿山深边部资源勘探工作，介绍了几种有效的地球物理方法的勘探效果，供其他危机矿山在进行深边部资源勘探加以借鉴。

**关键词**：危机矿山；深边部；资源勘探；地球物理勘探技术

## 1　我国危机矿山深边部资源勘探具有广阔的前景

目前我国矿业形势十分严峻：一方面，现有大批矿山基地的已探明储量日趋枯竭；另一方面，新发现的矿床和接替资源又越来越少，从而导致我国新建矿山不多，而大批老矿山，特别是一些大型矿山，因资源危机而面临或濒临关闭的严峻局面。由于这些大型老矿山不仅在我国矿产资源保障体系中占有非常重要的地位，而且对所在地域的经济以及社会稳定都具有十分重要的影响，因此开展大型老矿山基地的接替资源勘查特别是深边部的资源勘探，具有十分重要的经济和社会意义。

我国现有矿山的勘探深度多在 800m 以内，采矿深度大多在 500m 以上，国内目前最大的采矿深度只达到 1100m，这与国外相比还存在相当大的差距，如南非的开采深度达 4000m，加拿大达 2000m，美国达 3000m，印度达 3500m。从我国现有经济技术来分析，可采深度至少可达 1500m，这表明在现有的矿山，还有相当大的深度区间是勘探的空白区，仍具有很大的找矿潜力。近年来，国内外众多找矿成果也证明了危机矿山深部找矿的巨大潜力。专家认为我国危机矿山深边部具有很大的找矿前景，主要表现在：浅部资源危机，深部资源潜力巨大；矿山本区资源危机，外围资源潜力巨大；已知矿床类型资源危机，新类型资源潜力巨大。如江西银山九区铜矿及铜官山铜矿山延深部找到的特大型冬瓜山铜矿等，矿床埋深均在 1000m 左右；云南个旧矿田近 50 年来，平均 3～5 年就提交一个大、中型矿床；辽宁青城子铅锌矿在其外围相继发现了高家堡子大型银矿、桃源、白云金矿等，从而有力地证明了上述论证。

因此危机矿山深边部接替资源勘探是解决这些矿山资源危机最有效的途径。

## 2　危机矿山深边部找矿难度大，必须寻求勘探技术的突破

危机矿山深边部接替资源勘探之所以未能取得全面突破，一方面是由于勘查投入的严重不足；另一方面是由于所投入的方法技术缺乏科学论证，没有充分考虑方法的有效性，因而效果不明显，难以解决矿山找矿勘查所面临的特殊难题；此外勘探方法几十年来没有改变，新的观测参数和方法发展缓慢，也制约了勘探效果的突破。因此，要想在危机矿山深边部取得好的找矿效果，除了大幅度增加勘查投入外，更应该在勘查技术创新方面下功夫，针对矿山找矿的特殊性，创建一套适合我国地质条件的、矿山深边部及外围隐伏矿床(体)定位预测的理论体系和实用的资源勘查技术集成。这就需要对地质、物探、化探、遥感和信息处理等多学科进行融合，特别要针对不同矿山开展地球物理勘探技术有效性的研究。地球物理勘探技术作为通过研究地层不同的电性等参数以达到资源勘探目的的勘探技术，如何综合利用其在我国危机矿山的深边部资源勘探中的应用，是一个值得深入研究的课题。

就地球物理而言，危机矿山深边部找矿主要存在以下困难：

1、危机矿山大多经历了长时间的勘探，浅表矿、易找矿大多已被发现，各个矿山基本已形成了一套成熟的勘探方法，因此按照传统的矿床模式、成矿理论和勘探方法，难以取

[上接第 119 页]

[6] 敬荣中. 新世纪勘查地球物理的发展及我院勘查地球物理发展的对策思路[J]. 矿产与地质，2001. 04，15(82).

[7] 王烨，曹哲民，等. 铁路隧道工程勘察中高频大地电磁测深应用效果研究[J]. 工程地质学报，2005. 09，13(3).

[8] A A考夫曼，G V凯勒. 频率域和时间域电磁测深[M]. 北京，地质出版社，1987. 08.

[9] 张宪润，陈儒军. 激电相对相位法区分矿与非矿的成功实例[J]. 物探与化探，1998. 8，22(4).

得突破；

2、在危机矿山深边部找矿要求地球物理方法的探测深度大、分辨能力强；

3、许多矿山都存在碳质干扰，因此要求地球物理方法能有效区分矿致异常和碳质异常；

4、危机矿山的各种设施、坑道和废石对所采用的地球物理勘探方法可造成极大干扰，特别是矿山用电干扰，这就要求所投入的地球物理勘探仪器抗工业电流干扰的能力很强。

虽然在我国大型危机矿山深边部存在很大的找矿潜力，但要发现并证实这些潜在的资源绝非易事，不是简单地仅依靠某种技术或者凭借偶然的机会就能实现，往往需要一个长期艰苦而复杂的研究和验证过程。

## 3 地球物理勘探技术及其在危机矿山深边部资源勘探能力的研究

地球物理方法种类繁多，涉及重力、磁力、电（磁）法、地震、放射性等，各种方法在危机矿山深边部资源勘探中都有成功应用的实例，从原理上讲这些方法都可用于危机矿山深边部资源勘探。鉴于放射性勘探主要用于核工业行业，而重磁法已由我国专业地球物理队伍进行了小比例的面积性工作，资料基本覆盖了我国国土面积，更大比例尺的扫面工作正在进行之中，本文主要讨论国内固体矿产接替资源勘探工作中常用而有效的地球物理方法。

### 3.1 大地电磁测深法（MT法）

大地电磁测深法是 1950 年代初由 A.N.Tikhonov 和 L.cagnird 分别提出来的。1960 年代以前该方法发展很慢，但自 1970 年代以来由于张量阻抗分析方法的提出、远参考道方法的应用、数字化记录设备以及现场实时处理系统的采用，使该方法在全球得到了较快发展。该方法属于被动源法，测量的是天然电磁场的信号，通过计算得到频率—阻抗、频率—相位等一系列原始资料，再通过反演处理可以得到地下不同深度范围内的电性分布，进而达到寻找有一定电性差异的矿产资源的目的。

该方法作为固体矿产资源勘探方法有以下优点：由于不需要人工场源，因而装置轻便，机动性好 观测参数多，可以从多个侧面提供地下构造信息；勘探深度大，最大可达几十公里。不足之处在于 勘探速度慢，工作成本高，不适应开展面积性工作 ;天然场信号微弱，不适用于在危机矿山开展工作。

因此该方法自 1960 年代中期引进以来，主要用于油气资源的勘探，不宜作为危机矿山深边部开展矿产资源勘探。

### 3.2 EH-4 电导率成像法

EH-4 电导率成像法是由通过美国 EMI 电磁仪器公司与 GEOMETRICS 公司联合开发的 STRATAGEM(TM) 电磁系统而发展起来的一种大地电磁法。该系统将可控源与天然源相结合起来，就危机矿山资源勘探而言，只采用天然源勘探部分，此时该方法实际上仍是大地电磁测深法，其方法特点与上面描述的 MT 法没有本质区别，因此该方法同样不宜作为危机矿山深边部开展矿产资源勘探。

### 3.3 可控源音频大地电磁法（CSAMT法）

可控源音频大地电磁法是加拿大多伦多大学的 D.W.Strangway 教授和他的研究生 Myron Goldtein 在 1971 年提出来的。该方法针对天然电磁法场源的随机性、信号微弱以致观测十分困难的状况，采用可以控制的人工场源替代这种不能人为控制的天然场，变被动为主动。该方法在资料处理解释方面，援引大地电磁法（MT 法）的处理解释方法，随着方法的逐步发展与成熟，针对非平面波场的特殊性和局限性，人们对诸如近场改正、阴影校正、静态改正、场源效应等方面进行了大量研究，力求使该方法更加完美。

该方法作为固体矿产资源勘探方法有以下优点 勘探深度大，一般可达 2～3km ;工作效率高、成本低、可高效开展面积性工作 ;可以人工控制场源信号，便于压制人文干扰，获得高信噪比的数据。不足之处在于 :由于使用人工场源，因而装置笨重，机动性差 ;干扰因素多（如 场源影响、阴影效应等），非专业人士难以识别。

因此该方法经过 30 多年的发展已逐步成熟，在克服各种干扰情况下已成为危机矿山深边部接替资源勘探的重要方法。

### 3.4 瞬变大地电磁法

瞬变电磁法是利用人工场源在发射线圈加以脉冲电流，产生一个瞬变的电磁场，该电磁场垂直发射线圈向两个方向传播，通常是在地面布设发射线圈，依据半空间的传播原理，磁场沿地表向深部传播，当遇到不同介质时，产生涡流场，当外加的瞬变磁场撤销后，这些涡流场释放其产生的能量。利用接收线圈测量接收感应电动势（俗称二次场）的衰减曲线。该二次场包含了地下介质电性特征，通过种种解释手段（一维反演，视电阻率等）分析二次场的特性，可以得出地下岩层的结构，进而达到资源勘探的目的。

由于采用线圈接收二次场，故对空间的电磁场或其它人文电磁场较为敏感，为了减少此类干扰，应采用尽量大的发射电流，以获取最大的激励磁场，增加信噪比，压制干扰，该方法具有勘探深度大、抗干扰能力强等特点，可以作为危机矿山深边部接替资源勘探方法。

由于瞬变电磁法通常采用大电流或布置大的回线，因此导线和电源设备均较笨重，难于在地形起伏大、植被覆盖密的地区开展工作。

### 3.5 激电法

激电法是一种以岩矿石地电化学性质为基础的一种电化学方法，经过几十年的发展，从时间域到频率域、从幅频激电到相频激电已经形成了许多方法变种。从理论上讲不同的变种方法所观测的参数是可以相互变换或是等效的，所不同的是由于供电和观测方式的不一或大小不同，不同的方法具有不同的观测精度或找矿效果。理论和应用研究表明，在所有的激电法中以中南大学（原中南矿冶学院）发明的双频激电法最为有效，该方法通过发送机同时向地下提供高低两个不同频率的电流，接收机同时检测两个频率电流的极化特性。“十五”期间经中国地质调查局长达 3 年的方法技术示

范，充分验证了该方法由于采用同时、实时观测方案，因而具备轻便灵活、观测精度高、抗干扰能力强等特点，已成为危机矿山边部和中等深度寻找金属硫化矿最有效的方法。

### 3.6 地震勘探

地震勘探法利用人工激震产生的声波在大地中传播时遇到波阻抗界面产生反射的原理来寻找不同岩矿石的接触界面，进而划分地层、构造分布，寻找成矿有利部分或层位，达到大地资源勘探的目的。该方法具有勘探深度大、分辨能力强等特点，主要应用于油气和煤炭勘探。近年来对该方法应用于寻找构造复杂、界面不清的固体矿产资源的有效性进行了试验性研究，取得了一定的效果，在危机矿山深边部资源勘探方面，成功实例不多。

### 3.7 均匀广谱伪随机电磁法

均匀广谱伪随机电磁法是针对原有电磁法“变频”方案工作效率低、不能实现一机发送多机同时接收，观测精度难以保证，“奇次谐波”方案设备笨重、机动性差、不适应在西部中高山区开展面积性工作，常规激电法测量参数单一、不能有效区分异常源性质等缺点而提出的一种具有自主知识产权的地球物理新方法。该方法不仅适用于激电法，也适用于主动源电磁法，并具有以下特点：波形所含的主频率均按 $2^n$ 步进，并可依需要加密；各主频率点的振幅值基本相等，系统电源利用率高；各主频点起始相位相同，可实现多个频率的振幅值、绝对相位、相对相位谱精确测量，可根据所测得的谱特征准确判别地下异常源性质，进行矿与非矿区分；观测系统轻便，可实现一机发送多机接收工作方式，可进行快速面积性探测；能压制生产矿山工业电磁干扰，可在生产矿山深边部开展接替资源勘探。

## 4 地球物理勘探技术在危机矿山的应用

长期以来，地球物理方法在危机矿山深边部接替资源勘探方面取得了一定效果，基于上述分析，本文选择了几个有代表性的应用研究实例。

### 4.1 伪随机激电法在铜陵铜矿区的应用

铜陵是我国最早建立的铜原料基地，也是我国重要的五大骨干产铜基地之一，然而，由于开发历史长，铜陵地区矿山的保有铜储量已严重不足，在其所属的七大矿山中，已有三个闭坑，一个濒临闭坑，如不加速勘查接替资源，铜陵的自产铜能力将迅速消失，这不仅会严重制约铜陵地区经济的发展，也将影响我国铜资源的安全性。

在对已有的地质、物探、化探、钻探等资料进行充分分析与研究后，课题组认为在凤凰山矿田内还可能找到规模可观的隐伏矿床，其中找矿潜力最大的区段是现采凤凰山矿床以南的相思树至横山岭一带，所以选择了该矿区作为本次研究的耙区。

由于伪随机多频激电法对于寻找硫化物型隐伏矿体非常有效，而凤凰山矿田的矿产主要为金属硫化物，所以在该耙区范围内进行了 100m×20m 网度的伪随机多频激电扫面测量，结合在已知剖面进行的有效性实验结果，综合分析该区内的视幅频率（Fs）、相对相位特征以及两者的相互关系（图 3、图 4），可确定在相思树耙区内存在两个有意义的激电异常带：东部异常带和西部异常带。东部异常带呈北北西走向，从 102 线至 112 线以 86/102－80/104－72/106－70/108－68/110－70/112 为轴线展布，到 112 线后转向北北东向，而 102 线往南并未封闭。西部异常带从呈北北东向沿 44/112－42/110－38/108－34/106－32/104－28/102 轴线展布，向南亦未封闭。这两个异常带基本对应着两条接触带构造。

对比东部异常与西部异常带，东部异常带的 Fs 和△φ 异常都强，连续性也要好得多，而且△φ 异常的特征更符合矿体的异常特征，所以东部异常是优先的找矿区段。

在 116 线的 44 号至 62 号点、114 线的 50 号至 52 号点，存在一半圆形的强异常，并且向北未封闭，但因为此异常值很高，Fs 和△φ 的异常空间变化太稳定，表现出强干扰特征，另外该地段太靠近矿山生产区（地表不到 100m 为露天采场，露天采场对应的地下有采矿坑道），推测该异常为地下分散型矿化叠加强电力干扰引起的异常。

根据对伪随机多频激电剖面异常与测深异常进行的全面分析，并结合已知的各种地质情况，推测 72/108 点的异常源的深度为 260m 左右，且其下部很可能存在其他含矿层，其视幅频率曲线表现为 KH 型，视电阻率测深曲线为 KHAA 型；32/102 点

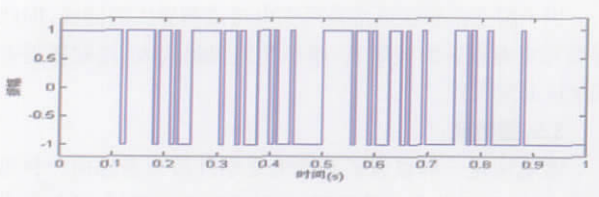



图 1　伪随机 7 频波波形图



图 2　伪随机 13 频波主频率振幅谱分布图

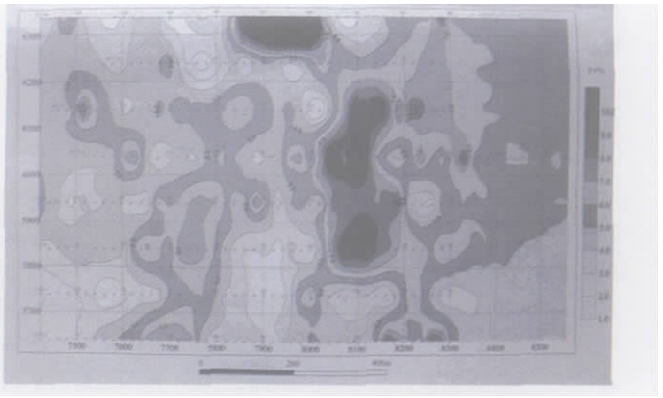


图 3　相思树耙区伪随机多频激电视幅频繁率等值线图

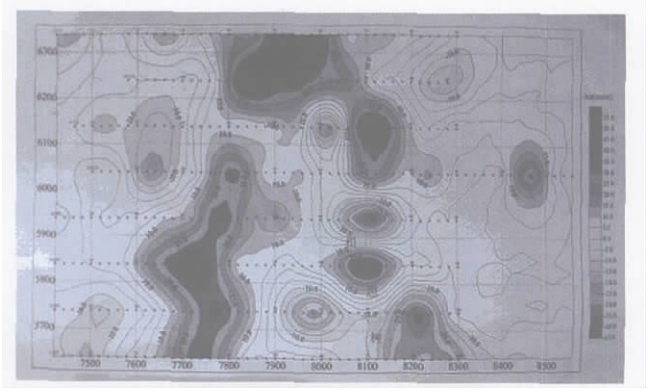


图4　相思树耙区伪随机多频激电相对相位等值线图

的异常源埋深为 40m 左右，为一浅部的矿致异常体，其视幅频率曲线类型为 KH 型，视电阻率测深曲线为 KHAA 型。

为了对相思树耙区的深部地质情况进行更深入地研究，采用了抗干扰能力更强、勘探深度更深的可控源音频大地电磁法（CSAMT），其主要任务有 3 个：一是寻找含矿有利空间位置；二是了解断裂构造的分布情况；三是宏观圈定大理岩与石英二长闪长（斑）岩的接触关系。为此在勘探耙区按 100m×40m 的网度布设了 11 条勘探线，通过对所有的勘探数据反演的结果分析后，发现 102 线的 32 号浅部同样存在一个低阻异常，在 108 线的 72 号点 200～300m 内有相应的低阻异常，与伪随机多频激电异常基本吻合。综合 11 条测线的电阻率二维反演结果，CSAMT 能够宏观地反映研究区岩性变化情况，含矿有利空间部位大致在 102 线至 112 线范围内，且这几条剖面上 1000～2000Ω·m 电性层比较发育，间接指示矽卡岩化石英二长闪长（斑）岩空间位置及分布形态。随后的钻孔和坑道验证了上述推断结果，找到了总厚度超过 60m 的金铜富矿体，取得铜可采储量 2 万吨、基础储量 7 万吨、资源量 20 万吨。

### 4.2 激电法在江永铅锌银矿的应用

江永银铅锌矿产于下石炭统石磴子组中的岩熔之中，通常矿体呈陡倾斜哑铃状，呈致密块状产出，矿体下部有一层厚度近 10m 的缓倾斜黄铁矿化地层，矿体与围岩具有明显的电性差异，致密块状铅锌矿通常有 20%左右的激化效应，这为在本区开展激电法提供了较好的前提。由于工作区地形起伏很大、矿体埋深大使得地面激电工作方式所观测到的数据不能客观地反映地下矿体的存在，因此工作中采取了近矿激电工作方式。

传统的地面电法工作中，供电和测量都是在地面进行的，而坑道或井中电法则是将供电电极和接收电极置于坑道或井中，因此其理论基础是全空间电场分布。近矿激电法是将一个供电电极置于坑道或井中揭露的矿体附近（对于体极化矿体可以将坑道中的电极直接布置于矿体上，而对于良导的面积化矿体则应将坑道中的电极离开矿体一段距离），以增加对矿体的有效激发电流，并减弱一次电场的影响，另一个供电电极则置于地表合适的位置，以增加对矿体激发的有效体积范围。测量电极则在地表沿着剖面测量，从而避免了坑道的束缚。利用这种方法可以发现深部矿体的延伸方向和边部盲矿体。

此次近矿激电工作使用的仪器也是中南大学地球物理勘察新技术研究所研制的，其发送机采用的是大功率伪随机多频激电发送机；接收机及工作方法与地面激电基本相同，接收机采用的是 SQ－2 型数字化双频激电仪，接收偶极子长度为 40m。一个供电电极位于 280 中段III号矿体的新鲜开拓面附近，另一个电极（俗称“无穷远极”）则布置在矿区西南边靠近尾砂坝的地方，AB 极距约 1500m，供电电流一般保证在 2000mA 左右。本次工作的视幅频率等值线平面图如图 5。从图中可以看到明显存在的多个异常，考虑到单点异常的不可靠性，按极化率大于 15%的等值线共圈出了 6 个异常（编号为 1～6 号异常）。

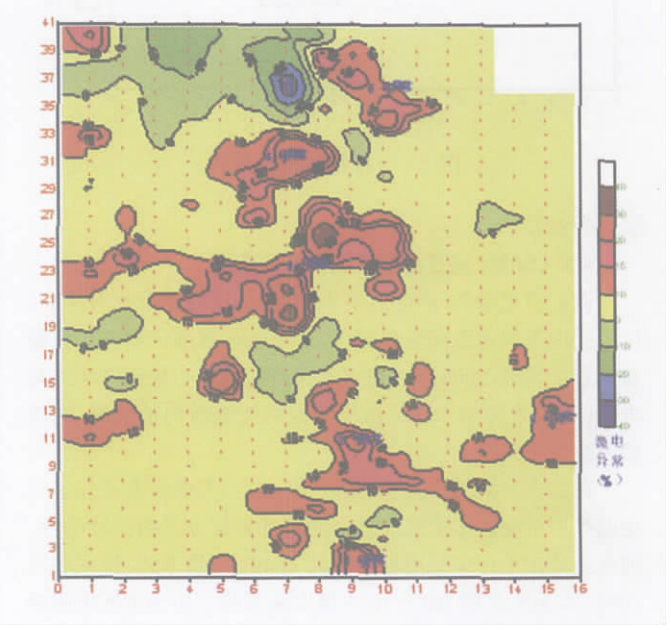


图5　近矿激电视幅频率 Fs 平面等值线图

结合近矿激电观测成果和矿区地质情况，对比已知矿体的分布可以清楚的看到：其中 2、3 号异常与对正在开采的已知矿体对应很好（2 号矿体的东北部采空区也十分清楚）。1、4、5、6 号异常推断为矿区内新发现的盲矿体，是本次工作的最新成果。根据现场踏勘我们认为VI号异常处是一个大的落水洞，对比 2、3 号已知矿体的异常我们推断 1、4、5 号异常是位于 300～500m 深处的矿体所引起的，6 号异常是由落水洞引起的（见图 6）。

根据部分坑道验证和同等规模的异常对比，对 1、4、5 号推断矿体进行远景储量估计，预测高品位铅锌矿石储量在 70 万吨左右，矿石铅锌含量 >15%，矿体埋深 300～500m。因此可延长矿山寿命 12～15 年。

此次工作的成果告诉我们：在矿区深边部开展地球物理探矿工作，往往由于人文干扰严重，要求的勘探深度大，因此应用常规物探方法很难取得好的勘探效果，而大功率伪随机多频激电仪的研究成功，一定程度上解决了这个问题，特别是在生产矿山寻找硫化矿体，开展伪随机近矿激电工作可取得

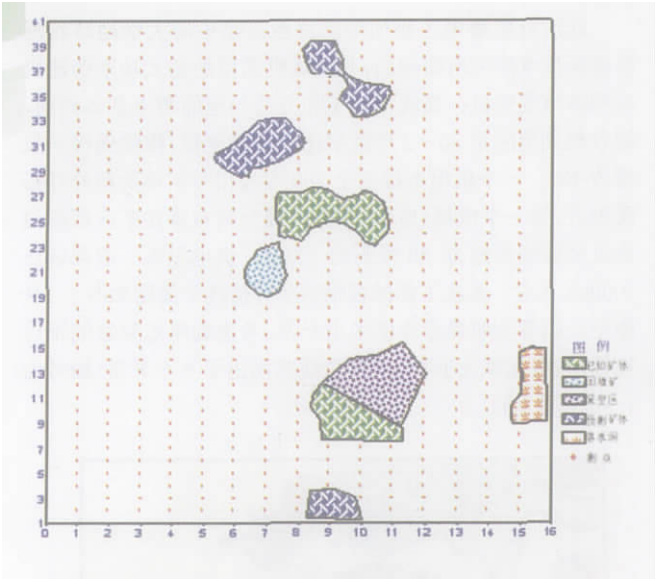


图 6　推断解释成果图

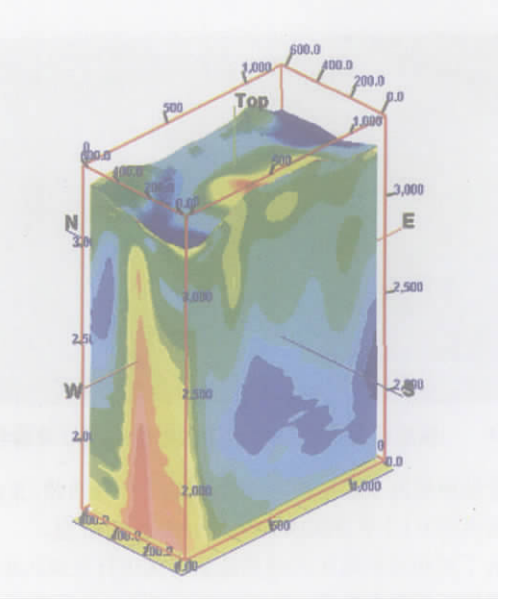



图 7　CASMT 法二维反演成果图

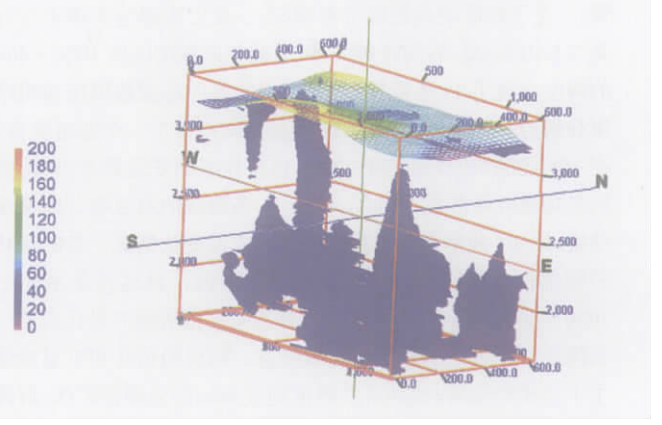



图 8　25 欧姆米视电阻率剩余图

很好的效果。

### 4.3 CSAMT 法在西部某铅锌矿的应用

该矿历史悠久，但经过多年的开采，保有储量相对减少，由于矿山重视深边部资源勘探，近年来在深部已取得了资源量的重大突破，2005 年在矿区东南部投入了可控源音频大地电磁法，力求弄清 1500m 深度范围内的地质构造情况，间接预测深部资源。

在综合分析以往本区物性的基础上，考虑到需要保证一定的数据密度，尽量保证划分的局部岩层分界线的准确性，因此决定在工作中采用标量谐波 CSAMT 测量方式，使用美国 ZONGE 公司生产的 GDP－16 大地电磁系统。由于本区电阻率值普遍较高，按矿区实测平均电阻率值计算，最终选择工作频率为 1～4096Hz，它是按二进制方式来改变的，这样的频段达到的最大勘探深度已经远大于工作要求的 1500m。本次共计完成 9 条剖面，300 个物理点。经各种改正后的二维反演成果图及 25 欧姆米视电阻率剩余图见图 7、图 8。

从图 7 中可以看出，本区视电阻率具有很好的连续性，各剖面的反演结果相互印证，深部高阻体（红色部分）明显将低异常（蓝色部分）沿剖面一分为二，这一特征从图 8 可以清楚的看到。这就进一步验证了本区两条含矿异常带的存在，并证明了其向东南埋深增大的趋势，与矿区钻孔验证结果相吻合。

## 5 结语

地球物理勘探方法颇多，但要在危机矿山（特别是生产矿山）接替资源勘探中能发挥作用、取得效果，首先必须具备强抗干扰能力，至少应该能通过增加观测信号强度压制矿山人文干扰，这就决定了必须是主动源方法。据此，伪随机多频激电法、可控源音频大地电磁法（CSAMT）、瞬变大地电磁法（TEM）、激电法等可以作为危机矿山深边部地球物理勘探的首选方法。其次，对不同矿山和不同矿种必须进行方法有效性试验，选择合适的方法或方法组合。

参考文献

[1] 彭省临，等. 大型矿山接替资源勘查技术与示范研究[M]. 地质出版社，2004.

[2] 何继善. 伪随机多频激电法研究[J]. 中国有色金属学报，1994，4(1)：1～10.

[3] 闻广，等，安徽铜陵凤凰山岩体若干特征及成矿关系[J]. 中国地质科学院院报，1983，(7)：1～22.

[4] 周建平，等. 个旧等锡矿中沉积组构的发现与矿床成因新探[J]. 自然科学进展，1999，9(5)：419～422.

[5] 张友山，等. 多频组合波电法的信号相干检测同步方案[J]. 中南工业大学学报，2000，31：191～194.

[6] 杨兵，韦龙明. 加强老矿山找矿，缓解矿山资源危机[J]. 有色金属工业，2002，9：18～20.

[7] 何继善，可控源音频大地电磁法[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1991.

[8] 牛之琏，时间域瞬变电磁法原理[M]. 长沙：中南工业大学出版社，1993.

[9] EH-4 操作手册. 劳雷公司，1998.