

# 微重力法与可控源音频大地电磁法组合在豫西寻找 隐伏铝土矿中的应用

刘国印<sup>1,2</sup>, 燕长海<sup>1,2</sup>, 赵建敏<sup>1,2</sup>, 王纪中<sup>2</sup>, 李中明<sup>1,2</sup>

LIU Guo-yin<sup>1,2</sup>, YAN Chang-hai<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-min<sup>1,2</sup>, WANG Ji-zhong<sup>2</sup>, LI Zhong-ming<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学, 北京 100083;

2. 河南省地质调查院, 河南 郑州 450007

1. China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, Henan, China

**摘要:**通过方法试验,在豫西地区已知铝土矿区的外围开展了 1:5 万高精度重力测量,发现绝大多数矿床点位于较平缓的重力梯度带上,基底相对稳定的地段可作为铝土矿的找矿靶区;采用 CSAMT(可控源音频大地电磁)法测深剖面,卡尼亚电阻率-频率曲线拐点可直接反映出新生界覆盖层和奥陶系灰岩层的埋藏深度,进而推断石炭系本溪组(铝土矿)的埋深。经 10 余个钻孔验证,见矿率达 80% 以上。试验结果证明,在地质研究的基础上,微重力法加上 CSAMT 法测深是寻找隐伏铝土矿的有效的方法组合。

**关键词:**隐伏铝土矿;微重力;CSMAT;豫西

**中图分类号:**P618.45;P631.1;P631.3\*25

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2552(2008)05-0641-08

Liu G Y, Yan C H, Zhao J M, Wang J Z, Li Z M. Applications of combined microgravity survey and CSAMT sounding in search for concealed bauxite deposits in western Henan, China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(5):641-648

**Abstract:** The authors carried out 1:50000 high-precision microgravity survey through methodological experiments at the peripheries of the known bauxite mining area in western Henan and found that most ore deposits are located in gentle gravity gradient zones and that areas with a comparatively stable basement are bauxite exploration targets. The burial depths of the Cenozoic cover (aluminiferous rocks) and Ordovician limestone (dolostone) bed can be directly reflected by the controllable source audio frequency magnetotelluric (CSAMT) sounding section and Kania resistivity-frequency curve inflexion and then further the burial depth of the carboniferous Benxi Formation (bauxite) may be deduced. Checks and verification of more than ten boreholes show that the ore encountering rate reaches more than 80%. The results of tests prove that the combined microgravity survey and CSAMT sounding carried out based on the geological study are an effective technique combination for looking for hidden bauxite deposits in western Henan.

**Key words:** concealed bauxite deposit; microgravity survey; CSMAT; western Henan

中国铝土矿需求的加大带动了铝土矿的勘查。长期以来受铝土矿“次生富集”观点的影响,大多数研究者认为“铝土矿在潜水面以下 200 m 就会贫化,为不合工业要求的致密铝土岩”<sup>[1]</sup>。何立贤<sup>[2]</sup>在山西

孝义铝土矿潜水面以下 400 m 左右发现了高品位的铝土矿,同样在河南支建矿区、夹沟矿区也在 350 m 以下见到了优质铝土矿。因此,从露头到浅部再到深部这种品位差异应看成是“变化”,而不是“贫化”,在

收稿日期:2007-09-07;修订日期:2007-12-04

地调项目:中国地质调查局国土资源调查项目《河南陕县—新安—济源地区铝土矿调查评价》(编号:1212010532403)和河南省两权价款项目《河南省重要成矿区带 1:5 万区域矿产调查》资助。

作者简介:刘国印(1963-),男,在读博士,教授级高级工程师,从事矿产地质勘查与研究工作。E-mail:liugy2011@163.com

华北地区铝土矿的深部找矿前景是光明的,可以预测,在原来勘查深度 200 m 以下还存在至少为查明资源/储量 1/3 的资源潜力,深部找矿很有必要。

对铝土矿勘查而言,寻找隐伏矿将是今后工作的主要目标。宏观信息被掩盖,微观信息和间接信息变弱,对所有的勘查战略与方法都是一大难题<sup>[9]</sup>。找到一种或一套有效的方法(组合)是当务之急。笔者通过开展《河南省重要成矿区带 1:5 万区域矿产调查》项目,在陕县—新安及府店一带进行了物探找矿方法试验,取得了良好的效果。

1 工区地质背景

河南铝土矿为石炭系本溪组的 G 层铝土矿,分布在三门峡—郑州—平顶山这个三角地带。测区大地构造位置属华北陆块南部,为构造隆起与坳陷的接合部位。底板为中奥陶统马家沟组或上寒武统的碳酸盐岩,为一水硬铝石型铝土矿床。全省平均含铝岩系厚 11.42 m,铝土矿厚 3.83 m,含铝岩系最大厚度为 68.34 m,铝土矿最大厚度为 57.95 m。铝土矿成矿物质主要来自古陆岛铝硅酸盐岩或基底碳酸盐岩的风化产物,总体上来说,以基底碳酸盐岩为主<sup>[4]</sup>。

测区具稳定陆块的双层结构。太古宇和古元古界深变质岩系构成基底,构造以深层次剪切作用、中浅层次韧性剪切带和叠加褶皱为特征;盖层以发育开阔平缓的褶皱及浅层次脆性断裂为特征。区域构造格架表现为渑池向斜盆地和北西与北东向断裂交织的断块,主干断裂有三门峡—鲁山断裂、马沟断裂

(新安—襄城断裂)和洛河断裂。

在本次工作区范围内,北部古构造线为近东西向,南部古构造线为 NW 向,隆起区与坳陷区相间分布,坳陷区是含铝、煤岩系的赋存部位。

本溪组是铝土矿、山西式铁矿、耐火粘土矿最主要的赋矿岩系,为一套铁质、铝质、粘土质岩层,层理不甚发育。铝土矿赋存于含矿岩系的中上部,其上下均为粘土岩。本溪组与下伏奥陶系平行不整合接触,与上覆太原组整合接触,厚 0.45~68.34 m,平均厚 15.18m(表 1)。

以往煤矿勘查过程中有部分钻孔见到了含矿岩系,厚度大于 10 m 者一般常有铝土矿,大于 15 m 者则有富铝土矿。陕县—新安一带的铝土矿层延伸较稳定,铝硅比很高,钻探证实铝土矿赋存深度大于 400 m(图 1),深部铝土矿的铝硅比仍达 10 左右。大口集—府店一带的铝土矿,中浅部受岩溶地貌的控制形成一系列厚大的矿体,深部铝土矿亦有稳定的延伸。

2 区域地球物理特征

在收集以往地层物性成果的基础上,本次补充测定了相关岩矿石的物性参数,结果见表 2。

从表 2 中可知,本区地层的密度、电阻率具有从新到老逐渐增大的特征,主要存在 3 个密度差异较大的密度层和 2 个密度界面,它们依次为第四系—新近系密度层,密度为  $2.25\times10^3\text{kg/m}^3$ ;中生界—上古生界密度层,平均密度为  $2.43\times10^3\text{kg/m}^3$ ;下古生

表1 铝土矿、山西式铁矿、耐火粘土、高铝粘土矿的特征

Table 1 Characteristics of bauxite, Shanxi-type iron ore, fireclay and high-alumina clay

赋矿岩系的特征	厚度/m
上覆太原组	
⑤深灰色薄层状粘土岩(或铝土岩)及含铁粘土岩:为粘土矿的主要层位之一,局部可达铝土矿的工业品位	0.15~13.08
④灰色深灰色厚层状铝土矿:具豆鲕状、碎屑状结构,有时为微粒结构、凝聚结构,块状构造,靠近地表风化带常具土状构造、多孔状构造和蜂窝状构造,多孔体中曾见生长有板钛矿晶体。为主矿层,大部为 1 层矿,有时有薄的夹层,分为 2~3 层。在剖面上各种矿石类型对应性不强	0.10~57.95
③浅灰色薄层状铝土岩:泥状结构,微具页理构造,为粘土矿的主要层位	0.30~17.92
②杂色页岩、粘土岩:上部为含铁粘土岩、铁质粘土岩,局部夹铁矾土矿,下部常有不厚的灰色粘土岩,底部有时有炭质页岩	0.24~26.75
①铁质粘土岩夹山西式铁矿层:由褐红色铁质粘土岩、含铁绿泥石及褐铁矿、赤铁矿组成。有时有黄铁矿,深部含黄铁矿较多。铁矿分为 2 层:上层为透镜状、似层状铁矿,有时呈豆鲕状结构;下层为鸡窝状铁矿,中部被铁质粘土岩隔开	0.12~9.57
下伏奥陶系	

注:据温同想<sup>[9]</sup>的资料整理修改

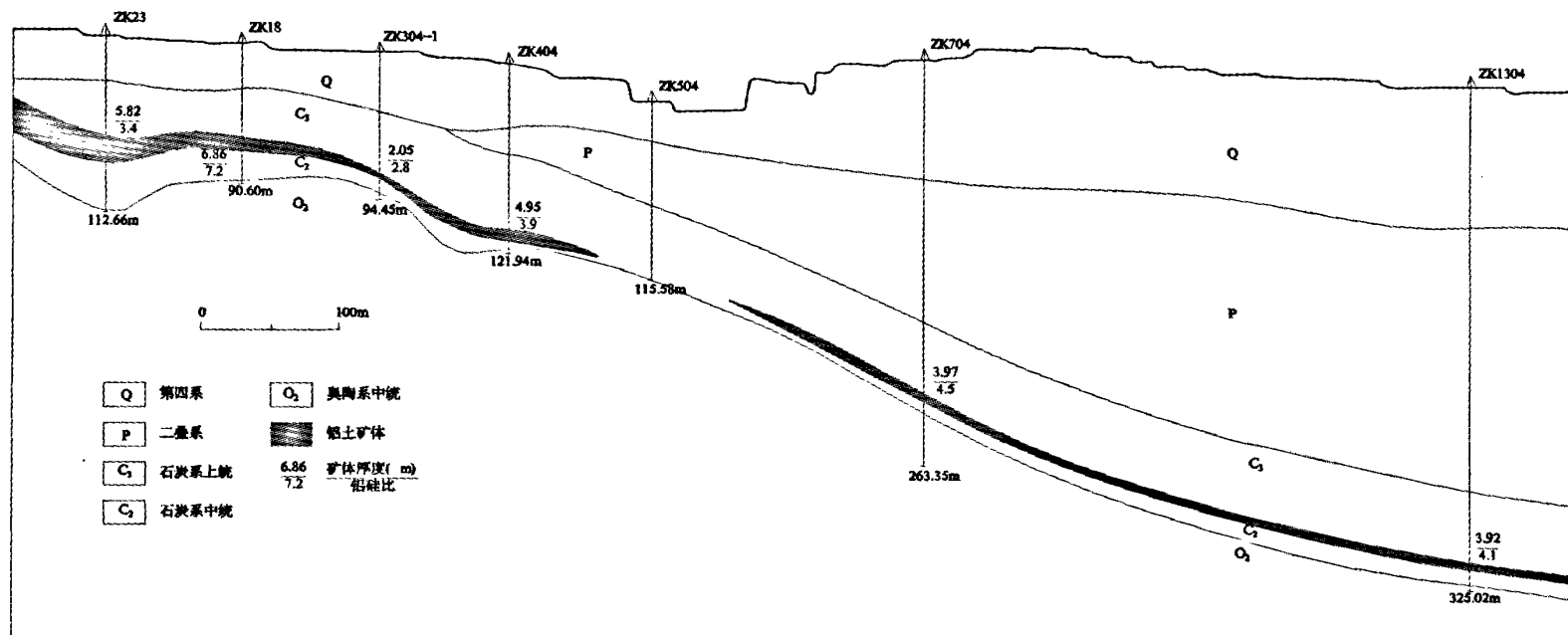
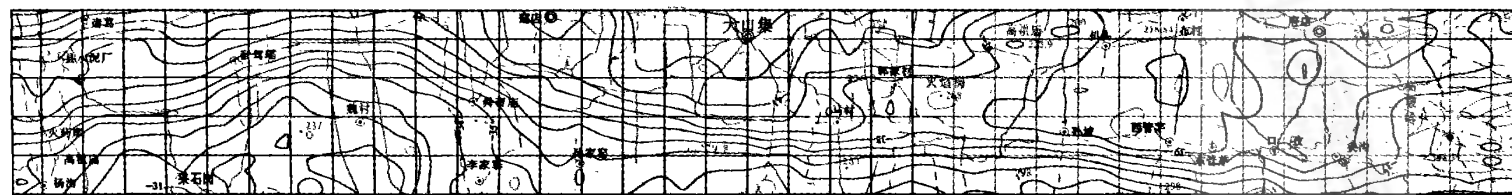


图1 偃师夹沟铝土矿区04勘探线地质剖面

Fig.1 Geological section along exploration line 04 of the Jiagou bauxite mining area, Yanshi



注:异常数值的单位为  $10^{-5} \text{m/s}^2$

图2 龙门—诸葛一带低通滤波( $R=2.0 \text{km}$ )布格重力异常

Fig.2 Low-pass filter ( $R=2.0 \text{ km}$ ) Bouguer gravity anomaly in the Longmen-Zhuge area

表2 河南重要铝土矿区岩石、矿石的物性

Table 2 Physical properties of rocks and ores in important bauxite mining areas of Henan

地 层	主 要 岩 性	电阻率( $\Omega \cdot m$ ) 极化率 (%)	卡尼亚电阻 率/ $\Omega \cdot m$	平均密度 / $10^3 \text{ kg} \cdot m^{-3}$	
第四系	黄土、砂砾石	15~100 / 0~2.0	5~100	1.91	2.22
新近系	粘土岩、砂岩	100~2000 / 0~2.0	10~150	2.30	
白垩系	粘土岩、砂岩			2.42	2.42
三叠系	长石砂岩、细砂岩、页岩			2.39	
二叠系	砂岩、页岩、粘土岩			2.45	
石炭系	粘土岩、炭质页岩、灰岩	300~5000 / 0~2.0	40~260	2.48	
奥陶系	灰岩	500~10000 / 0~1.0	50~2100	2.66	2.65
寒武系	白云岩、灰岩、页岩			2.63	
煤		100~1000 / 4.0~5.0	100~1000	1.95	
铝土矿、铁矿		120~190 / 0.5~0.9	30~190	2.95	

界密度层,平均密度为  $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。它们之间的密度差分别是  $0.18 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $0.22 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。铝土矿、煤矿的密度值一个较高,一个较低,相对于其围岩具有  $0.30 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  以上的密度差异。

下古生界的奥陶系和寒武系为高阻层,其值可达数千欧姆·米,新生界的电阻率较低。岩石的电阻率以灰岩、白云岩最高,其值可达数万欧姆·米,其次为砂岩,而铝土矿、煤矿、铁矿的电阻率较低,只有数百欧姆·米,与其围岩有较大的电阻率差异。

可见,利用重力测量法(微重力法)<sup>[6-7]</sup>及电磁测深法研究铝、煤、铁矿层,特别是奥陶系侵蚀面的空间分布特征,具有较好的地球物理前提。

### 3 物探方法试验

#### 3.1 区域高精度重力测量(1:5 万)

野外重力测量工作采用美国制造的 LCR-G、D 型重力仪,按 1:5 万精度自由网布设测点,一般 4~6 点/ $\text{km}^2$ ,重点区加密至 8~10 点/ $\text{km}^2$ ,共完成 6 个标准图幅,面积约  $2520 \text{ km}^2$ ,实测 13759 点,布格重力异常总均精度为  $\sigma_{\text{布}} \leq \pm 0.116 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ,测点重力精度  $\sigma_{\text{点}} \leq \pm 0.024 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ;加密区精度达到  $0.100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。

大口集-府店工作区位于嵩箕隆起北坡,诸葛-西村一带有一规模较大的重力异常梯级带,特别是诸葛段规模较大,走向近东西,宽 2km,梯度值可达  $10 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} / \text{km}$  以上(图 2)。已发现的铝、煤

矿均位于该梯级带上或其两侧,铝土矿多分布在梯级带的高值一侧,而煤多分布在梯级带的低值一侧,特别是梯级带的扭曲和膨大部位是铝、煤成矿的较好地区;口孜-西村段,梯级带宽缓,走向转为北西向,形成了煤的成矿带。重力异常梯级带由断裂带错断或奥陶系侵蚀面倾向较陡所致,其以南地区铝、煤矿层大多被剥蚀,以北地区铝、煤矿埋深逐渐加大,所以诸葛-西村一带的重力异常梯级带是形成铝、煤矿床的有利地带。

另外,在李村、布村和鲁庄分别形成了 3 个规模较大的高值局部异常,初步推测为古生界隆起所致。埋深较浅的李村、布村局部异常是铝、煤成矿的有利地区,鲁庄局部异常是找煤的有利地区。

张茅-新安工作区重力异常特征和大口集工作区基本一致,铝、煤矿床主要分布在澠池和新安 2 个区域低值异常的周边梯级带或高低异常的过渡带上,其走向以北西向和北东向为主、近东西向次之(图 3)。北西向重力异常多为规模较大的梯级带,如西南部的西村和北东部的铁门镇梯级带均是三门峡-鲁山北西向大断裂带及其次级断裂带的具体反映;北东向重力异常多为规模较大但较宽缓的梯级带,也可以称为高低异常的过渡带,宽可达十余千米,梯级带中间是矿床的集中分布地带。

结合地质情况,进一步研究弱小局部异常,寻找有利成矿区。在异常梯级带或高低异常过渡带的膨胀部位和扭曲部位,或者异常梯级带或高低异常过

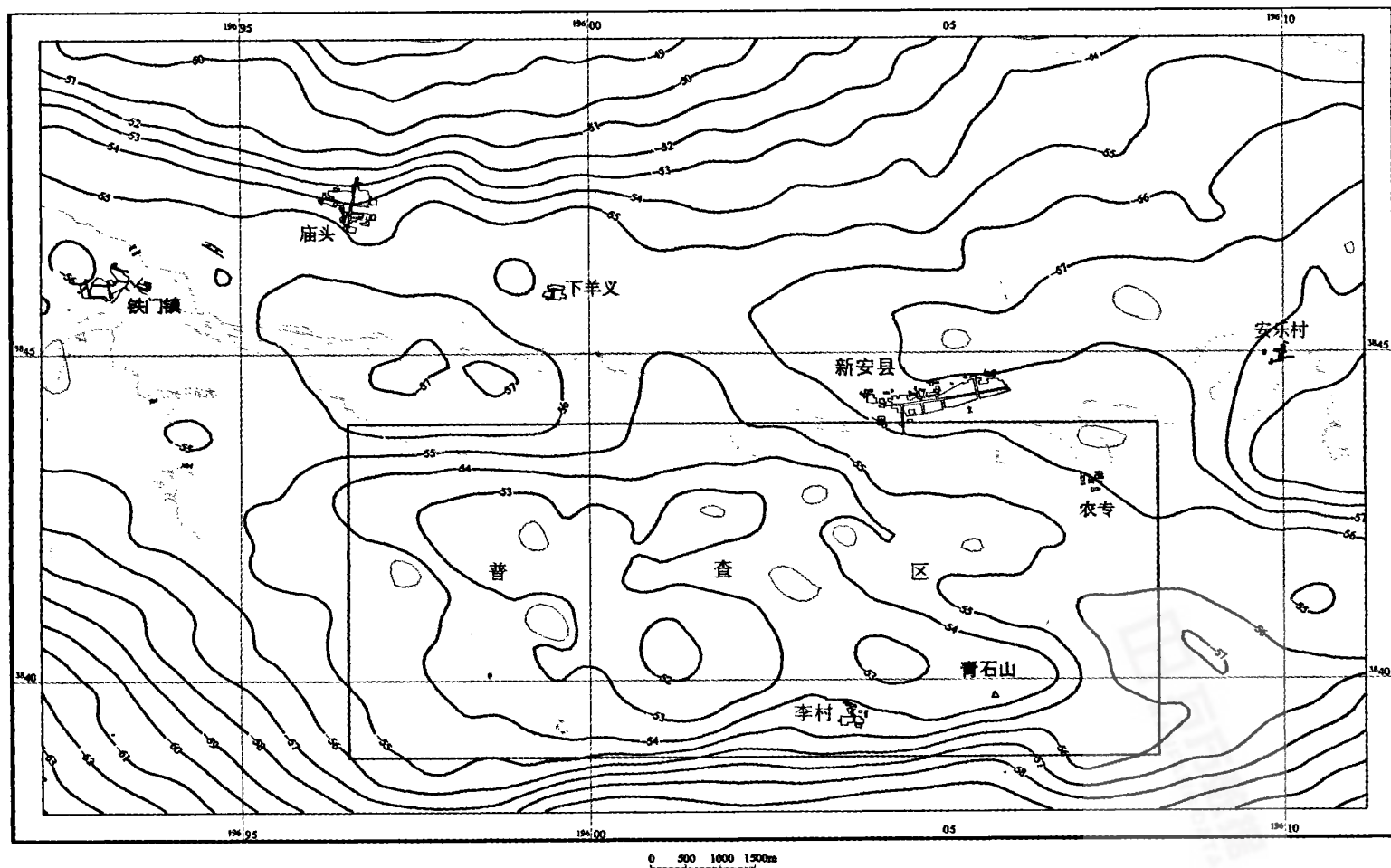


图3 新安郁山一带布格重力异常等值线(单位为 $10^{-5}\text{m/s}^2$ )  
Fig.3 Bouguer gravity anomaly contours in the Xin'an-Yushan area

渡带高值一侧的低局部异常和异常梯级带或高低异常过渡带低值一侧的高局部异常,往往是凸起中的凹陷或凹陷中的凸起,是成矿地层保留较好的部位,而且埋藏深度适宜。这样,初步圈定了找矿靶区。

### 3.2 可控源音频大地电磁(CSAMT)测量

CSAMT法在找矿方面的应用已有很多文献报道,尤其对研究深部矿床和地质构造比较有效,如日本南部著名的 Hishicari 金矿和美国威斯康星北部的 Crandon 金矿床的发现<sup>[8]</sup>;在国内,对山东栖霞百里店隐伏金矿床的勘探<sup>[9]</sup>也取得了较好的效果。

本次工作仪器为加拿大凤凰公司生产的 V6A 多功能大地电磁仪和配套的 T30 发射机、MG-30 发电机。使用 2 套 GPS 同步时钟分别控制发射和接收,通过计算机对所测数据进行近场改正、静态改正和正反演计算。

在龙门、新安 2 个铝土矿找矿靶区共施工了 13 条测线(D1~D16),其中龙门 4 条、新安 9 条,长度均为 1200~2900 m,测线间距为 800 m,点距 50 m,测点 448 个。试验采用 8F30 频率系统进行工作,此系统每次采集时间为 30 min,共计 76 个频点,频率变化范围为 14.634~9600 Hz,接收时采用 7 道同时测量测线方向的电场,1 道测量垂直测线方向的磁场,保证 2 个供电电极之间的连线与测量剖面平行。为保证勘探深度,采用大功率(30 kW)的发电机和发射机发射,接收与发射时间都由卫星同步时钟控制。接收部分采用不极化电极,有利于消除极化效应,保证接收信号的稳定可靠,电场信号在高频时一般为几十微伏,在低频时一般为几百微伏,甚至达到上千微伏。发射偶极距 AB>900 m,接收极距 MN=50 m,每个排列 350 m,收发距为 3000~4600 m,发射电流 I=14~15 A。

把 CSAMT 原始数据经过质量检查合格后,根据已知勘探线地质剖面的资料、电阻率单支曲线的类型确定地层划分标准,再经 Bostick 反演确定测深点的深度,绘制频率-视电阻率等值线图(图 4、图 5),结合地质资料和野外调查进行综合解释和推断。

## 4 钻探验证效果

### 4.1 新安郁山煤铝找矿靶区

该区位于新安县南,重力异常总体上近东西走向的高值异常带分别被 5 条次级东北向和北西向重

力异常梯级带切割。地质上为一背斜构造,轴向东,轴部已有寒武系、奥陶系出露,北东和北西向断裂带极为发育。

根据重力局部异常选定了有利成矿区,利用高精度重力异常圈定了找矿(铝煤)范围,可控源音频大地电磁测量结果较详细地反映了铝矿、煤矿的含矿地层,特别是奥陶系侵蚀面的起伏特征。钻探验证均在预测的深度见到了铝土矿层或煤层(图 5)。

### 4.2 诸葛找矿区

该区位于重力异常梯级带上,地质上为一单斜构造。根据重力异常特征布置了 2 条可控源音频大地电磁剖面,并在有利地区布置了 2 个钻孔。虽然钻孔见到了较好的煤层,没有见到铝土矿(图 6),但是所揭示目的层的深度和物探的推测吻合。

在 2 个找矿靶区共施工验证钻孔 12 个,工程主要集中在郁山一带(10 个钻孔),8 个钻孔见到铝土矿,2 个钻孔见到煤,仅有 1 个钻孔(ZK601)因断层影响本溪组埋深过大而未探至含矿层位。铝土矿层控制垂深达 350 m,最大埋深超过 540 m,矿层厚 1.44~14.00 m,平均 5.99 m。单工程平均  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 53.39%~75.03%,铝硅比为 2.03~22.48;全矿体(块段)平均  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 63.27%,铝硅比为 9.13。矿石品级多为 I 级,为优质铝土矿。矿石自然类型为豆鲕状和致密块状铝土矿。其中郁山矿段按埋藏深度约 500 m 圈定(334)?资源量  $1300 \times 10^4 \text{ t}$ ,并且向西矿层出现增厚的现象,铝土矿的规模有望继续扩大。

## 5 结论与讨论

(1)通过区域高精度重力测量初步圈出了 7 个铝、煤找矿靶区,对诸葛、郁山铝土矿靶区 CSAMT 测深剖面筛选出一批找矿前景较好的地段开展了钻探验证工作,并在预测的深度发现了厚度较大的高品质铝土矿。

(2)重力测量初步成果表明重力测量对揭示隐伏构造有重要的作用。在重力异常图上,断裂构造表现为清晰的重力梯度陡变带;重力异常清晰地反映出隐伏基岩的断隆起断陷落,对寻找煤铝来说,可以依据重力测量成果圈出埋藏较浅的赋存煤铝岩系的基岩断块作为找矿靶区。铝土矿带沿重力梯度带延伸,其重力梯度为差一中等,这种规律可以用于指导铝土矿找矿靶区的圈定。



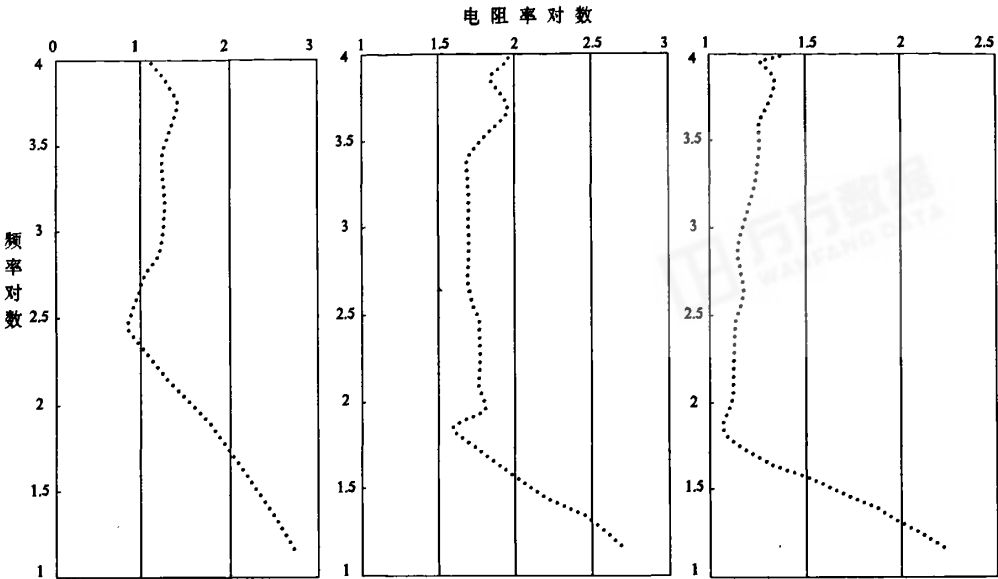


图4 CSAMT法测深曲线图(D2-875,D18-4475,D9-1325)

Fig.4 Graph of CSAMT sounding (D2-875, D18-4475, D9-1325)

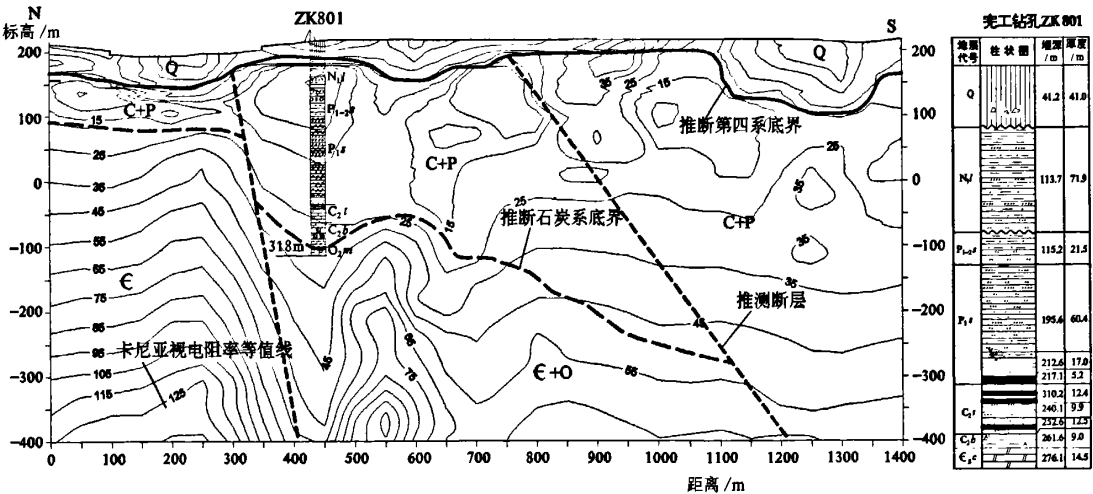


图5 新安郁山煤、铝找矿靶区8勘探线设计剖面与验证钻孔的对比

Fig.5 Correlation of the designed profile and confirmation hole of exploration line No. 8 in a coal-aluminum prospecting target area of Yushan-Xin'an

Q—第四系;N4—新近系中新统洛阳组;P1-3—二叠系石合子组;P1—下二叠统山西组;  
C2—中石炭统太原组;C2—中石炭统本溪组;C+P—石炭系-二叠系未分;O3m—中奥陶统童子营组;  
E+O—寒武系-奥陶系未分;E—上寒武统蔡家沟组;E—寒武系;电阻率数值的单位为 $\Omega \cdot m$

(3)深部钻孔的验证结果表明,可控源大地电磁测深方法可以较准确地确定石炭系底部不整合面的

位置、含铝岩系底板的起伏与岩溶状况,以及其上覆盖层的厚度。

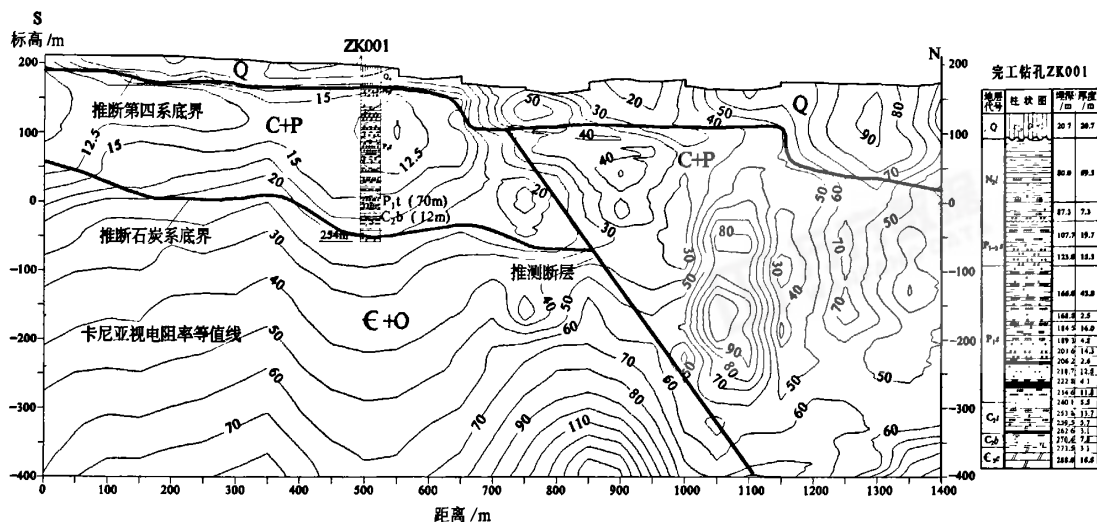


图6 龙门—诸葛一带煤、铝找矿靶区0勘探线设计剖面与验证钻孔的对比(地层代号注释同图5)

Fig.6 Correlation of the designed profile and confirmation hole of exploration line No. 0 in a coal-aluminum prospecting target area of Longmen-Zhuge

综上所述, 本区采用 1:5 万高精度重力测量圈定找矿靶区, 采用可控源音频大地电磁测量详细了解奥陶系侵蚀面和铝煤含矿地层的起伏特征, 配合地质分析进行找矿, 取得了较好的效果, 这是寻找铝、煤矿的一套有效的、多快好省的物探方法组合。

但是, 可控源大地电磁测深剖面测量难以根据电性参数确定铝土矿体(层)的存在与否。其次, 地下含水层的影响很大, 在面积较大的含水区, 电磁参数受到严重的干扰, 有时无法判断真实的岩性界面; 再者, 试验区属丘陵地貌, 地形相对平缓, 高精度重力及 V6 系统便于野外作业, 而在高差较大的山区, 较笨重的设备就会失去优势。

致谢: 在撰文过程中得到中国地质大学(北京)杨进、张寿庭教授的指导和帮助, 在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 廖士范. 中国铝土矿地质学[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 1991.
- [2] 何立贤. 关于“中国铝土矿的成矿机理和矿层贫化深度问题”的讨论[J]. 华北地质矿产杂志, 1996, 1: 111-115.
- [3] 施俊法, 姚华军, 李友枝, 等. 信息找矿战略与勘查百例[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 47-55.
- [4] 刘红涛, 杨秀瑛, 于昌明, 等. 用 VLF/EH4 和 CSAMT 方法寻找隐伏矿[J]. 地球物理学进展, 2004, 6: 276-685.
- [5] 温同想. 河南石炭纪铝土矿地质特征[J]. 华北地质矿产杂志, 1996, 4: 491-511.
- [6] 张晓春. 微重力测量在深部铝土矿找矿中的应用[J]. 河南地质, 1997, 9: 211-215.
- [7] 傅绍乾, 兰秀丽. 地震地质条件复杂地区高精度重力勘探的应用效果[J]. 石油物探, 1997, 3: 116-123.
- [8] 曹新志, 孙华山, 徐伯骏. 关于成矿预测研究的若干进展[J]. 黄金, 2003, 24 (4): 11-14.
- [9] 陈柏林. 金矿床和金成矿作用研究进展[J]. 地质评论, 2001, 47(1): 111-112.