

# 黔西南层控卡林型金矿床电性结构特征

——水银洞剖面音频大地电磁测深研究\*

杨炳南<sup>1,2</sup>,王家俊<sup>2</sup>,何彦南<sup>3</sup>,刘建中<sup>3</sup>,祁连素<sup>3</sup>,王泽鹏<sup>3</sup>,胡涛<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074;2. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇三地质大队,贵州 铜仁 554300;3. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇五地质大队,贵州 贵阳 550018)

**[摘要]**水银洞金矿作为黔西南层控卡林型金矿重要组成部分,矿体赋存于倾角较缓的不纯碳酸盐岩中,主要矿体以层状、似层状受控于主体褶皱灰家堡宽缓背斜两侧500 m附近。笔者在水银洞金矿343线已知矿体上开展了音频大地电磁法试验研究,重点对深部电性结构、背斜褶皱形态及不整合界面型金矿异常进行研究,结合物性特征,对实测的数据进行反演计算,得出由浅到深总体表现为“高阻-低阻-高阻”的分层电性特征,矿体、蚀变体的视电阻率值也集中表现为相对低值异常。在此基础上,对灰家堡背斜东部优选靶区(400勘探线)开展音频大地电磁法测深工作,获得了该区浅地表至二叠系中统茅口组电性结构特征,推测灰家堡背斜轴面向东倾没至“纳马塞”一带;最后,茅口组与龙潭组之间存在一稳定的横向中低阻条带状起伏界面异常,体现了背斜核部的强硅化砾状粘土岩型矿体和围岩之间的过渡特征。

**[关键词]**层控卡林型金矿床;音频大地电磁法;电性结构;构造格架;黔西南

**[中图分类号]**P618.51;P631.3<sup>25</sup> **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2016)01-0001-07

## 1 引言

黔西南层控型卡林型金矿床是滇黔桂“金三角”金矿矿集区的重要组成部分,成矿背景属黔西南二叠系-三叠系浅海碳酸盐台地相区<sup>[1-2]</sup>,区域上有烂泥沟、水银洞、紫木函、太平洞、戈塘、板其、丫他等一大批金矿床<sup>[3-5]</sup>。当前,对黔西南卡林型金矿的成矿构造背景<sup>[6]</sup>、矿床地质特征<sup>[7]</sup>、地球化学特征<sup>[8-9]</sup>、成矿物质来源、成矿模式等方面进行了较为全面的研究与探索<sup>[10]</sup>,取得了较为统一的认识<sup>[11]</sup>,位于灰家堡背斜东段的水银洞金矿床是滇黔桂“金三角”金矿成矿区层控卡林型金矿的典型代表矿床,矿体主要赋存于灰家堡背斜轴部500 m附近龙潭组中下部碳酸盐岩和中上二叠不整合界面的构造蚀变体中,为全隐伏(矿体埋深200~1 400 m)的“层控型”为主、“断裂

型”为辅的超大型金矿床<sup>[12-13]</sup>。王亮等人基于区域重磁资料,提出黔西南金矿由深部以中生代花岗岩或变质基底提供矿源层的供给模式<sup>[14]</sup>;邱小平等人利用可控源音频大地电磁测深对黔西南灰家堡金矿田深部褶皱形态进行了分析<sup>[15]</sup>,但对该区电性结构特征的系统性研究不多。为验证音频大地电磁法对该类型金矿深部探测的可行性,我们在水银洞金矿343线已知矿体上开展音频大地电磁法试验研究,从物性基础和地质模型出发,厘定了龙潭组-茅口组的界限,探讨了背斜褶皱的展布情况,为后续灰家堡背斜东部优选靶区音频大地电磁测深提供了参考依据。随后,在灰家堡背斜东部优选靶区400线获得了该剖面地表至二叠系中统茅口组电性结构特征,分析了灰家堡背斜褶皱及龙潭组-茅口组不整合界面的起伏形态,对于指导黔西南区域盲金矿找矿提供了地球物理学方面的证据。

**[收稿日期]**2016-01-02

**[基金项目]**中国地质调查局“贵州贞丰-普安金矿整装勘查区专项填图与技术应用示范”(项目编号12120114016301)资助。

**[作者简介]**杨炳南(1985—),男,博士研究生,从事地球物理勘查与应用工作。

## 2 水银洞研究区地质概况与岩石物性分析

滇黔桂“金三角”金矿区是由区域性北东向弥勒-师宗深断裂、东西向个旧-宾阳深断裂、北西向南丹-昆仑关深断裂夹持形成的三角形性区块,地处特提斯-喜马拉雅与濒太平洋两大全球构造域结合部东侧的扬子陆块与右江造山带两个次级构造单元结合部位,主体属扬子陆块一级构造单元内上扬子陆块二级构造单元中的南盘江-右江前陆盆地<sup>[16-17]</sup>。

### 2.1 地质概况

研究区地表出露及钻遇地层有:下三叠统永宁镇组、夜郎组;上二叠统大隆组、长兴组、龙潭组及中二叠统茅口组。由老至新分述如下:

茅口组( $P_2m$ )为浅灰色厚层泥晶生物碎屑灰岩、生物灰岩,局部含燧石结核。厚度 $>400$  m;龙潭组( $P_3l$ )为深灰色薄至中层细砂岩、粘土质粉砂岩、粉砂质粘土岩、粘土岩夹生物屑灰岩、泥灰岩、炭质粘土岩及煤线,厚度 $217.80 \sim 560.09$  m,为区内碳酸盐型矿体赋存层位;长兴组( $P_3c$ )为深灰色中层燧石条带生物屑灰岩夹钙质粘土岩。厚度 $40.59 \sim 50.36$  m。自东向西灰岩逐渐减少,钙质粘土岩逐渐增多,有零星断裂型透镜状矿体产出;大隆组( $P_3d$ ):深灰色中厚层含钙质粘土岩夹深灰色生物灰岩。以其间夹二至四层 $2 \sim 5$  cm浅黄绿色蒙脱石粘土岩为特征。厚度 $7.49 \sim 14.19$  m。有零星断裂型透镜状矿体产出;夜郎组( $T_{1y}$ )为灰、深灰、灰绿、紫红色薄至厚层灰岩、鲕粒灰岩、泥灰岩、薄层粉砂质粘土岩、粘土岩组成,厚度 $536.50 \sim 573.43$  m;永宁镇组( $T_{1yn}$ )岩性为灰色中厚层灰岩。厚度大于 $100$  m<sup>[18]</sup>。

灰家堡背斜轴部及附近 $F_{105}$ 、 $F_{101}$ 轴向断裂构

造是区内金矿主要控矿构造。金矿体主要产出于灰家堡背斜核部向两翼约 $500$  m范围内的二叠系硅化生物碎屑灰岩和中、上二叠统不整合面间因区域构造热液作用形成的构造蚀变体中。叠加的北东向构造主要控制了矿田内汞矿和铊矿的产出,南北向断裂构造为成矿期后构造,对区内金矿分布的连续性和稳定性具有不同程度的破坏作用<sup>[19]</sup>。

灰家堡背斜:为区内主体构造,东起者相,西止于老王箐附近,全长约 $25$  km,宽约 $6$  km,岩层倾角较缓,一般 $5^\circ \sim 20^\circ$ ,总体两翼基本对称。为一近东西向之宽缓短轴背斜,局部因后期改造而转为北西或北北西向,轴面向南倾。背斜核部向两翼 $500$  m范围内控制了金矿体之产出,是区内控矿构造<sup>[20]</sup>。

$F_{101}$ 断裂:发育于灰家堡背斜东段北翼,距背斜轴北 $500 \sim 800$  m,断裂倾向北,倾角 $55^\circ \sim 65^\circ$ 之间,破碎带宽 $5 \sim 20$  m,主要特征为碎裂化、硅化、褐铁矿(黄铁矿)化、褪色化,区内长 $12$  km,为逆断层,垂直断距 $60 \sim 220$  m,地表断层断距明显大于深部。在杨家田附近下盘发育牵引向斜,在普子陇以东发育上盘发育牵引背斜,局部地段被北东向断裂错断,该断裂破碎带及其牵引背斜轴部在龙竹函、下寨刘家纱厂、罗锅井有小透镜状金矿体产出<sup>[21]</sup>。

### 2.2 岩石物性分析

物性数据是地球物理勘查的基础性数据,是解决地质问题的描述性数据。我们采用标本测量法以钻孔岩芯为标本实测了 $115$ 个物性点,表1给出了包括了灰岩、粉砂岩、粘土岩、蚀变体等不同岩矿石的视电阻率参数物性特征,粘土岩电阻率值最低,其值低于 $600 \Omega m$ ;灰岩电阻率最高,其平均值超过 $4000 \Omega m$ ;粉砂岩电阻率平均值为 $1186.09 \Omega m$ ,介于该区高、低阻岩性之间;矿化蚀变体电阻率值也相对较小,为 $687.7 \Omega m$ 。

表1 岩矿石物性特征统计表

Table 1 Statistics of physical properties of rocks

岩性名称	地层代号	样点数	电阻率( $\Omega m$ )	
			变化范围	平均值
灰岩	$P_2m, T_{1y}, T_{1yn}$	59	$3166.79 \sim 5272.41$	4579.28
粉砂岩	$P_3l$	43	$706.13 \sim 1856.1$	1186.09
蚀变体	Sbt	35	$325.9 \sim 980.8$	687.7
粘土岩	$P_3l$	33	$460.67 \sim 639.44$	551.35

深部茅口组以灰岩为主,显示相对高值特性;中部龙潭组以粉砂岩、粘土岩为主,显示相对低值特性;大隆组和长兴组厚度较小,不易区分;上部夜郎组、永宁镇组等地层则以灰岩居多,显示高值特性;蚀变体在电阻率上与围岩虽然有一定差异,其综合电性特征表现为相对低阻,但其厚度较小,难以直接区分。由于矿体大多赋存于背斜褶皱-控矿断裂-地层岩性的最佳组合场所的特点<sup>[22]</sup>,加之垂向岩性组合的“高阻-低阻-高阻”的分层电性特征,具备间接找矿的物性前提。通过电性资料的分析和统计,结合研究区地质、钻孔资料,根据音频大地电磁剖面的电性结构可以揭示一定

深度范围内的地层及构造特征。

### 3 野外实验与数据

在已知区 343 线布设的 100 号线全长 2.55 km,点距 50 m,测线方向正北,52 个测点,中部与 343 号地质勘探线重合,剖面上有 12 个已知钻孔控制,局部地形起伏较大,地表植被发育。东部靶区 400 号线全长 4.05 km,方向 45°,点距 50 m,共 82 个测点,剖面尚无钻孔控制,该剖面总体地形起伏较缓,地表植被发育少。图 1 给出了本次工作的野外点位布置图和构造略图。

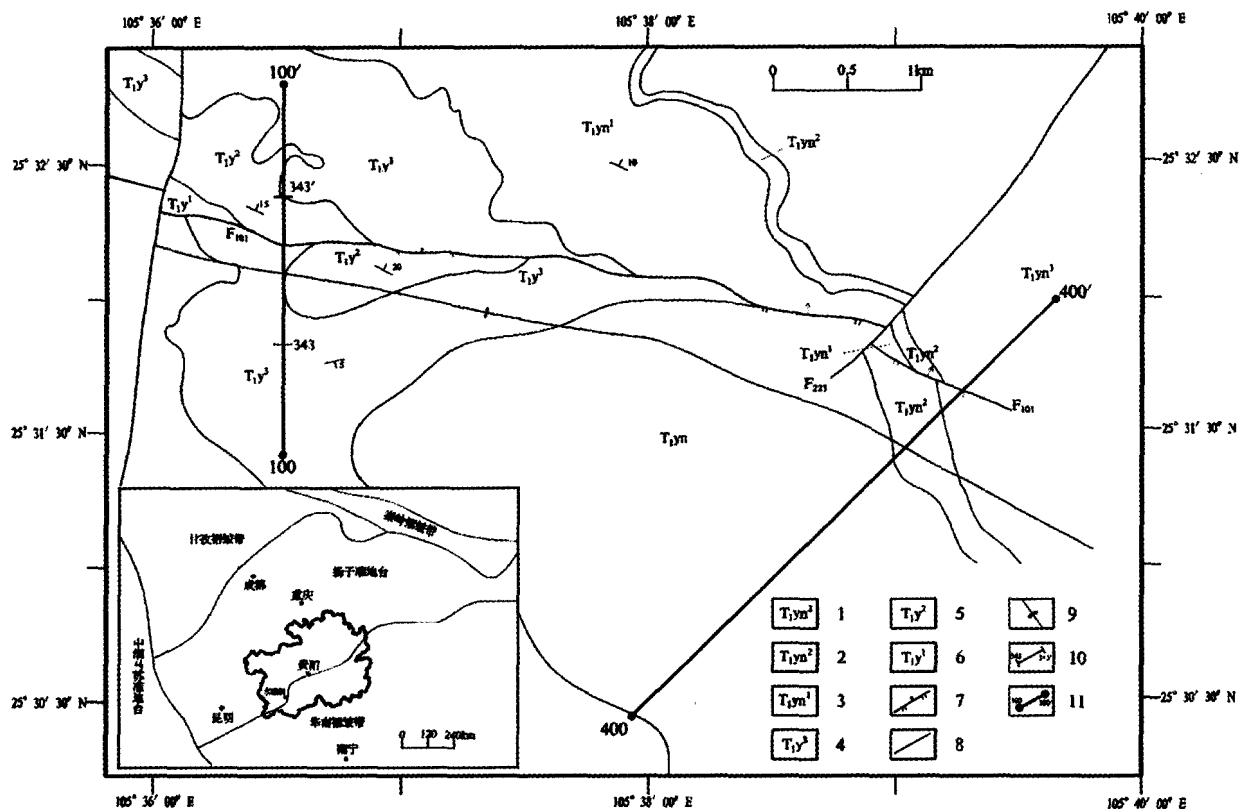


图 1 研究区构造背景及音频大地电磁测线位置图

Fig. 1 Structural background and AMT profile location of the target area

1—三叠系下统永宁镇组第三段;2—三叠系下统永宁镇组第二段;3—三叠系下统永宁镇组第一段;4—三叠系下统夜郎组第三段;5—三叠系下统夜郎组第二段;6—三叠系下统夜郎组第一段;7—逆断层;8—性质不明断层;9—灰家堡背斜;10—343 勘探线;11—音频大地电磁测深剖面及编号

使用加拿大凤凰公司 V8 电法工作站于 2015 年 6~7 月进行了音频大地电磁测深野外采集工作,采集频带范围为 0.35 至 10 400 Hz。同时观测 Ex、Ey 两个正交电场水平分量和 Hx、Hy 两个磁场分量的时间序列,为了保证采集质量,单点采集时间均大于 60 分钟。通过人机交互对原始数据进行总览,观测各道数据的质量,受人文干

扰随机性的影响,不同时段受干扰畸变影响程度不同,对照野外记录班报进行去噪与筛选,利用傅里叶变换对时间序列进行频谱分析,使时域信号转换为频域信号。采用 SSMT2000 进行阻抗张量估算,利用 Robust 阻抗张量估算,根据不同时段受干扰影响的畸变程度,用相关分析对噪声干扰进行压制,个别受人文干扰强的子功率谱通

过 MT-editor 进行删除,以保留高质量的子功率谱信息<sup>[23-24]</sup>。图2为100号线33、35、44号测点的音频大地电磁测深视电阻率、相位曲线,曲线结构形态整体相似,其视电阻率形态具有明显的横线分带的特征,10 400~900 Hz 是电性由低阻向高阻过渡带,表现为浅地表覆土层至永宁镇组灰

岩为主的高阻层;900~66 Hz 为电性由高阻向低阻的过渡带,表现为中段龙潭组粉砂岩为主的相对低阻层;66~0.35 Hz 为电性由低阻向高阻渐变段,表现为中深部不整合界面至茅口组灰岩为主的高阻层,总体上呈“高阻-低阻-高阻”的分层电性特征。

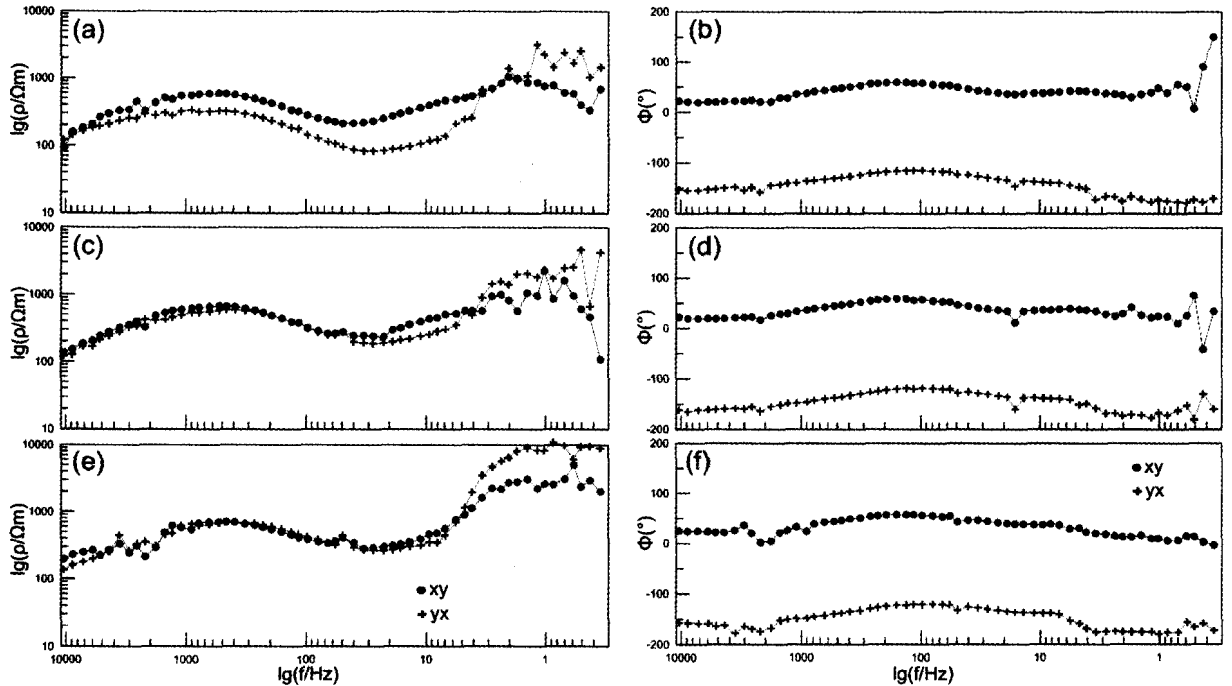


图2 音频大地电磁剖面典型测点视电阻率和相位曲线图

Fig. 2 Apparent resistivity and phase curve of typical AMT sites

a—33号测深点视电阻率曲线;b—33号测深点相位曲线;c—35号测深点视电阻率曲线;  
d—35号测深点相位曲线;e—44号测深点视电阻率曲线;f—44号测深点相位曲线

作为描述均匀无限半空间探测深度重要指标趋肤深度近似表达式  $H = 503$ ,在频率相对不变的情况下,半空间电阻越大,则趋肤深度大;半空间电阻越小,其相应趋肤深度小<sup>[25-26]</sup>。研究区物性标本数据实测 AMT 数据表明研究区近地表至深部视电阻率变化范围为 100~5 000 Ωm,按最低电阻率 100 欧米米估算,频率为 1Hz 的音频大地电磁信号的趋肤深度将超过 5 km,根据趋肤深度 H 与勘探深度 D 的近似关系,  $H = D$ <sup>[27]</sup>,探测深度大于 3.5 km。实测数据低频段(1.02~0.35 Hz)视电阻率、相位曲线均出现了明显的震荡跳跃,考虑到 1Hz 已满足研究区目的层深度 2 000 m 的要求,对该低频段数据不带入后期反演。

### 4 电性结构

当前音频大地电磁反演比较常用的有二维快

速松弛反演(RRI)<sup>[28]</sup>、奥克姆(OCCAM)<sup>[29]</sup>、非线性共轭梯度(NLCG)<sup>[30]</sup>等,二维反演作为指导 AMT 地质解释的最终手段,运用三种反演方法对已知 343 勘探线的 100 剖面进行了反复反演,考虑到 TE 模式对浅部、局部异常更为灵敏,但对深部反映较差;TM 模式较 TE 模式对局部三维体的影响不太敏感<sup>[31-32]</sup>,且 TM 模式对深部反映较好<sup>[33]</sup>,结合该区以往的反演工作经验,综合了这几种常规反演方法在本区的适用性后,选择 TM 模式的数据进行 NLCG 反演,经过反复修改反演控制参数,初始模型采用带地形的二维反演模型,背景电阻率为 100 Ωm 的均匀半空间,通过不同的正则化因子  $\tau$  权衡拟合均方差(RMS)和模型光滑度<sup>[34]</sup>,最终选取  $\tau$  为 20 的反演模型,迭代 40 次,拟合差为 2.83,兼顾模型光滑度的同时较好地拟合了数据,图3是100线二维 NLCG 反演电性结构模型图。

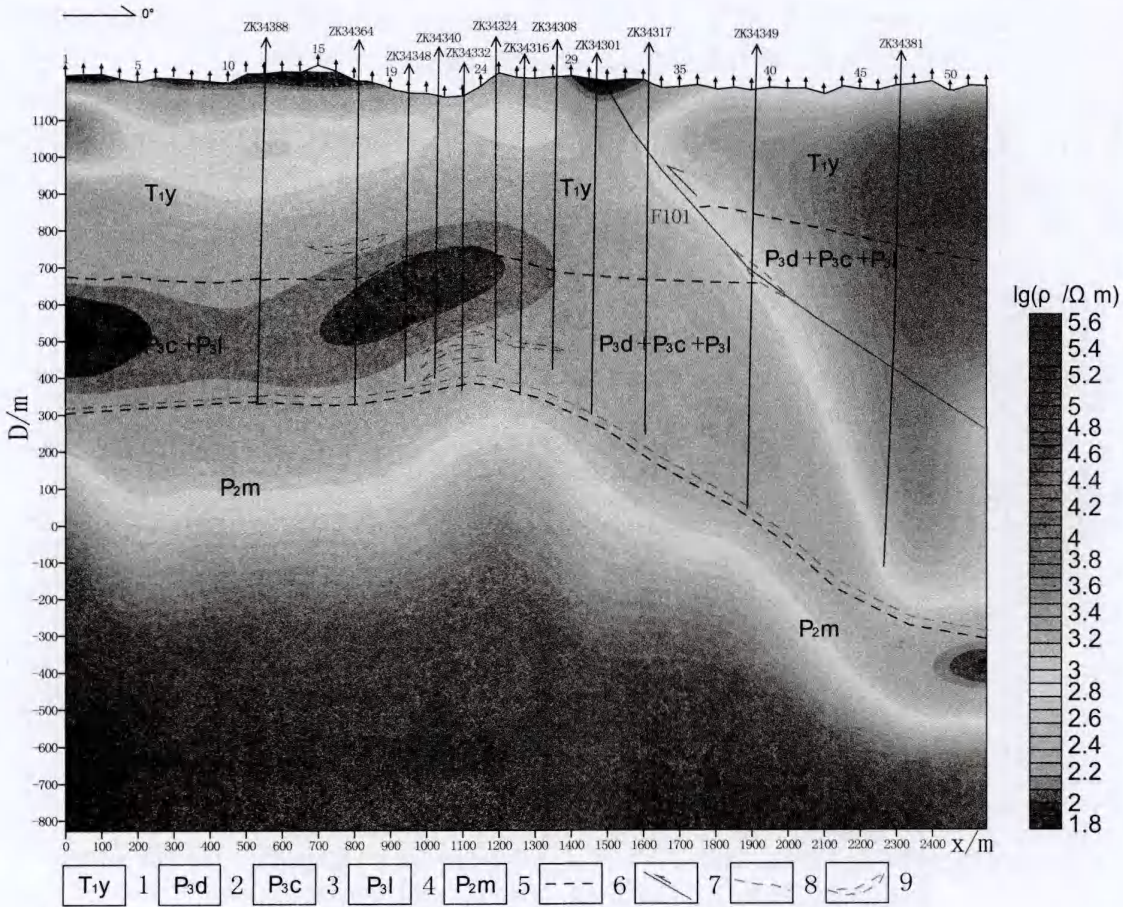


图 3 水银洞 100 线二维 NLCG 反演电性结构模型

Fig. 3 Resistivity model of Shuiyindong line 100 from 2d NLCG inversion

1—三叠系下统夜郎组;2—二叠系上统大隆组;3—二叠系上统长兴组;4—二叠系上统龙潭组;  
5—二叠系中统茅口组;6—推测地质界线;7—逆断层;8—蚀变体异常;9—矿体

通常情况下,电阻率等值线密集、扭曲或发生畸变时,代表电性急剧变化,电性梯度带、错断带及畸变带往往是不同电性介质间层面或构造褶皱带的反映,反之,等值线稀疏、平稳说明电性层较稳定;等值线沿剖面方向的起伏形态反映电性组合层的断面构造行迹,等值线的分布规律可以指示电性断面的结构特征<sup>[35]</sup>。结果表明:视电阻率垂向上变化较为明显,上部夜郎组碳酸盐岩组合显示相对高阻电性;龙潭组粉砂岩、生物碎屑灰岩、粘土岩则呈现相对低阻;底部茅口组灰岩呈高阻电性,深部茅口组和龙潭组之间的层控型蚀变体表现出了一明显的视电阻率高低值界面。视电阻率由浅到深总体表现为“高阻-低阻-高阻”的分层电性特征,矿体、蚀变体的视电阻率值也集中表现为低值异常。横向上视电阻率也有较强的变化,F<sub>101</sub>断层上下盘视电阻率差异明显,表现为上盘相对高阻、下盘相对低阻的组合特征,F<sub>101</sub>断层

则位于该高、低阻界面交汇处。在 20 至 30 号点、高程 1 000 ~ -300 m 段,视电阻率呈似层状“凸”形展布,26 号点以下集中反映了灰家堡背斜核部的深部延展趋势,表现为背斜南翼较北翼宽缓的特点。

通过水银洞 343 线已知区的综合对比,按照以“相似类比”理论为指导的成矿预测理论与方法,为进一步了解灰家堡背斜东部的构造格架与含矿地质体埋深,特别是背斜构造倾伏端、背斜轴转折端及翼部的特征,我们对灰家堡背斜东部优选靶区(400 勘探线)开展音频大地电磁法测深工作。结果表明:永宁镇组、夜郎组灰岩显示高阻电性,局部有低值反应,推测与岩溶、裂隙发育有关;龙潭组粉砂岩、生物碎屑灰岩、粘土岩则呈现相对低阻电性,局部有较明显的 4 个低阻顺层条带异常,推测为含矿的大孔隙度不纯的碳酸盐岩引起;底部茅口组灰岩,视电阻率又呈现高阻电性,视电

阻率由浅到深总体表现为“高阻-低阻-高阻”的分层电性特征;66号点附近有一视电阻率不连续面,推测为逆断层F<sub>5</sub>的异常反映,倾向北东,倾角约60°,且伴随有次生性质不明断裂发育。在21至42号点、高程1000~-500m段,视电阻率出现较为明显的背斜褶曲异常,背斜南西翼产状变

化相对较大,北东翼则相对宽缓,推测灰家堡背斜轴面向东倾没至“纳马寨”一带;22~55号点之间,茅口组与龙潭组之间存在一稳定的横向中低阻条带状起伏界面异常,体现了背斜核部的强硅化砾状粘土岩型矿体(即构造蚀变体异常)和围岩之间的过渡特征。

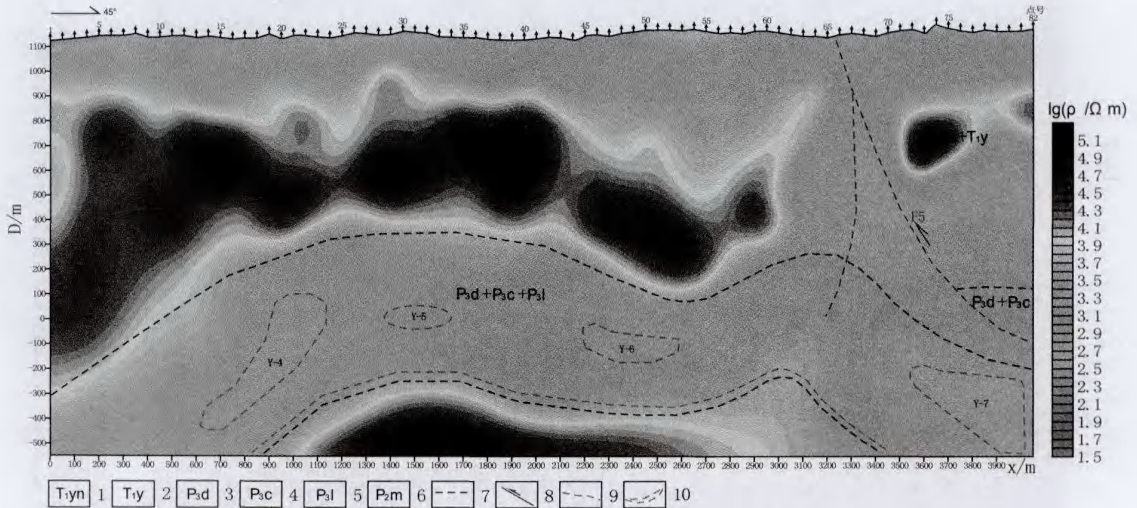


图4 水银洞400线二维NLCG反演电性结构模型

Fig. 4 Resistivity model of Shuiyindong line 400 from 2D NLCG inversion

1—三叠系下统永宁镇组;2—三叠系下统夜郎组;3—二叠系上统大隆组;4—二叠系上统长兴组;5—二叠系上统龙潭组;  
6—二叠系中统茅口组;7—推测地质界线;8—逆断层;9—蚀变体异常;10—低阻异常体

### 5 结论

针对研究区如何判别深部构造格架及隐伏岩体的空间位置的困难,按“从已知到未知”和“相似类比”原则,通过音频大地电磁测深剖面的二维电性结构,结合区域成矿模式及前人研究成果,获得以下认识:

(1)通过在已知剖面的实验研究,获得了该地区较为合适的音频大地电磁数据反演模式及参数。选装TM模式数据进行NLCG反演,初始模型采用带地形的二维反演模型;背景电阻率为100Ωm的均匀半空间,正则化因子τ为20的反演模型,迭代40次。

(2)对比2条剖面的反演结果,发现垂向电性结构特征十分相似,从浅地表至深部茅口组,表现为高阻-低阻-高阻的三元分层结构,作为容矿地层的二叠系龙潭组整体岩性表现为低阻,夹持在上覆高阻岩性组合和下伏高阻岩性组合之间。

(3)通过视电阻率等值线沿剖面方向的起伏形态分析,厘定了主体控矿构造灰家堡背斜及断

层的构造行迹。从研究区东部优选靶区400号线看,灰家堡背斜南西翼产状变化相对较大,北东翼则相对宽缓,推测灰家堡背斜轴面自西向东倾没;66号点下方的电性畸变带与地表推测断裂F<sub>5</sub>性质吻合,断裂F<sub>5</sub>北东部高阻体推测为受逆断层推覆牵引的夜郎组碳酸盐岩的电性反映。

(4)龙潭组中段含金矿体呈低阻特征,电阻率小于300Ωm,受灰家堡背斜、岩性双重控制,产状与地层产状基本一致;P<sub>2m</sub>~P<sub>3l</sub>不整合界面之间的构造蚀变体呈低阻特征,电阻率介于800~1500Ωm之间,横向连续性较好,基底形态起伏明显。

### [参考文献]

[1] 欧阳玉飞,刘继顺,周余国,刘卫明,高启芝. 卡林型金矿研究的若干问题探讨[J]. 地质调查与研究,2009,32(2):138-143.  
[2] WANG Chenghui, WANG Denghong, XU Jue, YING Lijuan, LIU Lijun, LIU Shaobao. A preliminary review of metallogenic regularity of gold deposits in China[J]. ACTA GEOLOGICA SINICA(English Edition), 2015, 89(2):632-651.  
[3] 杨治,何朋友,刘伟,柳建新,代伦,韩雪. 黔西南卡林型金

- 矿床稀土元素地球化学特征[J]. 广东微量元素科学, 2011, 18(11): 59-66.
- [4] 李得刚, 曾小华, 关有国, 张国伟, 曲建明. 中国卡林型金矿床成矿地质特征探讨[J]. 有色金属(矿山部分), 2012, 66(1): 24-30.
- [5] NIE Aiguo, MEI Shiquan, GUAN Daiyun, WU Pan, ZHUANG Zhuru. A study on the genetic relations between Permian Longtan Formation coal series strata and Carlin-type gold deposits, southwestern Guizhou Province, China [J]. Chin. J. Geochem, 2008, 27: 291-298.
- [6] 刘建中, 刘川勤. 贵州水银洞金矿床成因探讨及成矿模式[J]. 贵州地质, 2005, 22(1): 9-13.
- [7] 刘建中, 邓一明, 刘川勤. 贵州省贞丰县水银洞层控特大型金矿成矿条件与成矿模式. 中国地质, 2006, 33(1): 169-177.
- [8] 周余国, 刘继顺, 王作华, 欧阳玉飞, 高启芝, 刘德利, 黄元有. 从滇黔桂“金三角”区域地层地球化学演化特征探讨卡林型金矿的物质来源[J]. 地学前缘, 2009, 16(2): 199-208.
- [9] 王泽鹏, 夏勇, 宋谢炎, 游彬, 邓新华, 汪小勇. 黔西南卡林型金矿成矿物质深部来源: 来自同位素和稀土元素证据[J]. 矿床地质, 2010, 增刊(29): 519-520.
- [10] 陈懋弘. 滇黔桂卡林型金矿的构造型式和构造背景[J]. 矿物学报, 2011, (增刊): 192-193.
- [11] 郑禄林. 黔西南卡林型金矿研究现状及展望[J]. 矿产与地质, 2015, 29(1): 59-64.
- [12] 刘建中, 夏勇, 邓一明. 贵州水银洞超大型金矿床金的赋存状态再研究[J]. 贵州地质, 2007, 24(3): 165-169.
- [13] 王成辉, 王登红, 刘建中. 贵州水银洞超大型卡林型金矿同位素地球化学特征[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 396-403.
- [14] 王亮, 龙超林, 刘义. 黔西南隐伏岩体圈定与金矿物源探讨[J]. 现代地质, 2015, 29(3): 702-711.
- [15] 邱小平, 孟凡强, 于波. 黔西南灰家堡金矿田成矿构造特征研究[J]. 矿床地质, 2013, 32(4): 783-793.
- [16] 聂爱国, 李俊海, 欧文, 管代云, 梅世全. 黔西南卡林型金矿床形成特殊性研究[J]. 黄金, 2008, 2(29): 4-8.
- [17] 牛翠祯, 王科强, 李绍儒. 滇黔桂成矿区金矿资源预测评价[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1 576-1 583.
- [18] 刘建中, 陈景河, 邓一明. 贵州水银洞超大型金矿勘查实践及灰家堡矿集区勘查新进展[J]. 地质调查与研究, 2009, 32(2): 138-143.
- [19] 刘建中, 夏勇, 陶琰, 等. 贵州西南部 SBT 与金梯矿成矿找矿[J]. 贵州地质, 2014, 31(4): 267-272.
- [20] ZHANG Yu, XIA Yong, SU Wenchao, TAO Yan, ZHANG Xingchun, LIU Jianzhong, DENG Yiming. Metallogenic model and prognosis of the Shuiyindong super-large strata-bound Carlin-type gold deposit, southwestern Guizhou Province, China [J]. Chin. J. Geochem, 2010(29): 157-166.
- [21] 刘建中, 夏勇, 张兴春, 邓一明, 苏文超, 陶琰. 层控卡林型金矿床成矿模型-贵州水银洞超大型金矿[J]. 黄金科学技术, 2008, 16(3): 1-5.
- [22] 陶平, 马荣, 雷志远. 扬子区黔西南金矿成矿系统综述[J]. 地质与勘探, 2007, 43(4): 24-28.
- [23] 杨振威, 张昆, 严加永, 陈向斌. 宁-芜矿集区及其西缘深部结构初探[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4160-4168.
- [24] 尹兵祥, 王光鄂. 大地电磁阻抗张量正则分解的地质含义分析[J]. 地球物理学报, 2011, 44(2): 279-288.
- [25] Schmucker U, Jankowsky J. Geomagnetic induction studies and the electrical state of the upper mantle [J]. Tectonophysics, 1972, 13: 233-256.
- [26] 马晓冰, 孔祥儒, 刘宏兵, 闫永利. 青藏高原东北部地区地壳电性结构特征[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 689-697.
- [27] 杨生, 鲍光淑, 张全胜. 远参考大地电磁测深法应用研究[J]. 物探与化探, 2002, 26(1): 27-31.
- [28] Smith JT, Booker JR. Rapid inversion of two and three dimensional magnetotelluric data [J]. Geophys. Res. 1996, 96(B3): 3905-3922.
- [29] DeGroot-Hedlin C, Constable SC. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data [J]. Geophysics, 1990, 55(12): 1613-1624.
- [30] Rodi W, Meakie RL. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. Geophysics, 2001, 66(1): 174-187.
- [31] Ledo J, Queralt P, Marti A, et al. Two-dimensional interpretation of three-dimensional magnetotelluric data: An example of limitations and resolution [J]. Geophys. J. Int., 2002, 150(1): 127-139.
- [32] Wannamaker P E, Hohmann G W, Ward S H. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths [J]. Geophysics, 1984, 49: 1 517-1 533.
- [33] Siripunvaraporn W, Egbert G. An efficient data-subspace inversion method for 2-D magnetotelluric data [J]. Geophysics, 2000, 65(3): 791-803.
- [34] Hansen P C. Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-Curve. SIAM Review [J]. 1992, 34(4): 561-580.
- [35] 谢成良, 叶高峰, 魏文博, 金胜. 藏北高原主要断裂带电性结构特征[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3 991-4 002.

## Distribution Regulation and Prospecting Significance of Sulfur-rich Iron Mine in Dushan Area of Guizhou

YANG Xing-yu, LI Xue-qing, HUANG Lin

(104 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Duyun 558000, Guizhou, China)

[ **Abstract** ] Many sulfur-rich iron mines distributed on the box anticline of Dushan and usually appears with antimony, lead-zinc and mercury, the orebody occurs in NW, NEE and NE conjugate shear fracture zone and the nearby influence zone, the ore-bearing wallrock mainly are limestone and dolomite of Dushan formation, middle Devonian series and quartz sandstone of Danlin formation and Shujiaping formation, low Devonian. Because the difference of wallrock lithology, pyrite formed different ore assemblies with antimony, lead-zinc and mercury. So pyrite in this area has big economic value and it is the indirect prospecting symbol of antimony, lead-zinc and mercury.

[ **Key words** ] Sulfur-rich iron mine; Distribution regulation; Prospecting symbol; Dushan area; Guizhou

(上接第 7 页)

## Electrical Structural Features of Strata Bound Carlin-type Gold Deposit in Southwest Guizhou

—Audio Magnetotelluric Sounding of Shuiyindong section

YANG Bin-nan<sup>1,2</sup>, WANG Jia-jun<sup>2</sup>, HE Yan-nan<sup>3</sup>, LIU Jian-zhong<sup>3</sup>,  
QI Lian-su<sup>3</sup>, WANG Ze-peng<sup>3</sup>, HU Tao<sup>2</sup>

(1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Tongren 554300, Guizhou, China; 3. 105 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development, Guiyang 550018, Guizhou, China)

[ **Abstract** ] Shuiyindong gold deposit is an important part of Karlin-type gold deposits in southwest Guizhou, the orebody occurs in impure carbonate rock of low angle, the main orebody is controlled by the two sides of Huijiabao anticline 500m nearby as stratiform and stratoid. Audio magnetotelluric sounding experience was studied in the known orebody of line 343 in Shuiyindong gold deposit, especially the deep electrical structure, anticline fold shape and unconformity interface gold anomaly. With the physical features, the tested data were back calculated and showed the layer electrical feature of 'high resistance-low resistance-high resistance' from shallow to deep, the apparent resistivity of orebody and altered rock showed low anomaly. On the basis, Audio magnetotelluric sounding was studied in the precedence target area of east Huijiabao anticline, the electrical structure features are known from shallow plane to Maokou formation, middle Dyas of this area, it was supposed the axial surface of Huijiabao anticline leaned east to Namazhai area. Finally, a stable lateral middle-low resistance stripped irregular plane anomaly existed between Maokou formation and Longtan formation, it showed the transverse features of strong silicified clay rock and wall rock of anticline core.

[ **Key words** ] Strata Carlin-type gold deposit; Audio magnetotelluric sounding method; Electrical structure; Tectonic framework; Southeast Guizhou