

# 电、磁综合方法在云南北衙铁金矿勘查中的应用

杨 剑<sup>1,2</sup> 王绪本<sup>1</sup> 王永华<sup>2</sup> 王 桥<sup>2</sup> 曾琴琴<sup>2</sup>

(1.成都理工大学地球物理学院,四川 成都 610059;2.成都地质矿产研究所,四川 成都 610081)

**摘要:**北衙金矿位于西南三江富碱斑岩成矿带区域,地质构造复杂,华里西期海相玄武岩和喜山期富碱斑岩极为发育;前者普遍具有热液型铜矿化,后者与金、铁、铅、锌、银等多金属矿床具有密切成因关系。本文针对北衙铁金矿,利用高精度磁测圈定的磁异常,结合音频大地电磁法,两种方法互补,遵循“从已知矿床到未知的原则”,紧密结合地质资料,较好地探测深部地质构造以及矿体的空间位置,为工程布置提供了有力的指导。

**关键词:**北衙铁金矿;高精度磁法;音频大地电磁法

**中图分类号:**P631;P612 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)02-0602-09

北衙金矿在大地构造上处于大理宁蒭北东向构造带汇合处,属于上扬子陆块的盐源—丽江中生代边缘拗陷带,为晚二叠世及早中三叠世的前陆拗陷。矿区位于西南三江富碱斑岩成矿带区域金沙江—红河富碱侵入岩带,是中国重要的铜(钼)、金(铅锌)成矿带。目前在该带上,陆续发现了一批与富碱斑岩体有关的金、铜、钼、铅锌矿床,如玉龙超大型铜矿床、西范坪铜金矿床、马厂箐(金厂箐)铜金矿床、姚安金铜铅锌矿床、金平铜厂铜钼矿及平安寨金矿等。北衙铁金矿北自锅厂河,南至金沟坝—鸡鸣寺大沟,西起红泥塘,东到笔架山黄坪坝子西侧边缘<sup>[1]</sup>。

经与区域地层对比,重新确定了矿区地层的时代,将原笼统的第四系地层“Q”归为全新统“Q<sub>4</sub>”;原第三系渐新统“丽江组”上段(灰质角砾岩)划归为第四系更新统“Q<sub>p</sub>”,下段(含砾砂质粘土岩)划归为第四系更新统蛇山组(Q<sub>1s</sub>);三叠系中统北衙组(T<sub>2b</sub>)地层时代不变;原三叠系下统(T<sub>1</sub>)碎屑岩确定为三叠系下统青天堡组地层(T<sub>1q</sub>);原二叠系玄武岩(P<sub>2β</sub>)划分为二叠系上统峨眉山组(P<sub>2β</sub>)。矿区构造上位于近南北向鹤庆—松桂复式向斜南段,矿区构

造与区域构造线方向一致,均呈近南北向展布。区内构造活动强烈,次级褶皱、断层以及节理(裂隙)发育<sup>[2]</sup>(图1)。

本文利用北衙金矿区1:2.5万地面重磁实测资料,结合音频大地电磁测深(EH4),进行综合处理解释,应用研究表明,此方法组合对深部铁金矿体控制较好。

## 1 方法特点

以岩石导电性差异为基础的音频大地电磁法(EH4)是电法勘探的一种分支方法,它是以天然场作为主要场源,辅以人工磁偶极子产生的高频电磁场来观测正交的两个电场分量( $E_x, E_y$ )和两个磁场分量( $H_x, H_y$ ),进而求得XY(电场)、YX(磁场)两个方向上的视电阻率和阻抗相位及视电阻率随深度变化的 $\rho_s-H$ 变化曲线。然后,通过多次叠代逼近的Born近似法反演,取得测深点解释结果。其频段观测范围较宽,高频为10 Hz~92 kHz,低频为0.1 Hz~1000 Hz;勘探深度随频率的降低而增大(电磁波在介质中传播时的趋肤深度 $\delta=500 \rho_s/f$ ),且布极方式灵活多变,根据地形地貌特征可分别选用

收稿日期:2013-05-16;改回日期:2013-12-16

基金项目:中国地质调查局项目云南北衙整装勘查区金矿找矿模型与综合找矿方法研究(12120113094500)资助。

作者简介:杨剑,男,1983年生,博士生,工程师,从事地球物理勘探;E-mail:115138871@qq.com。

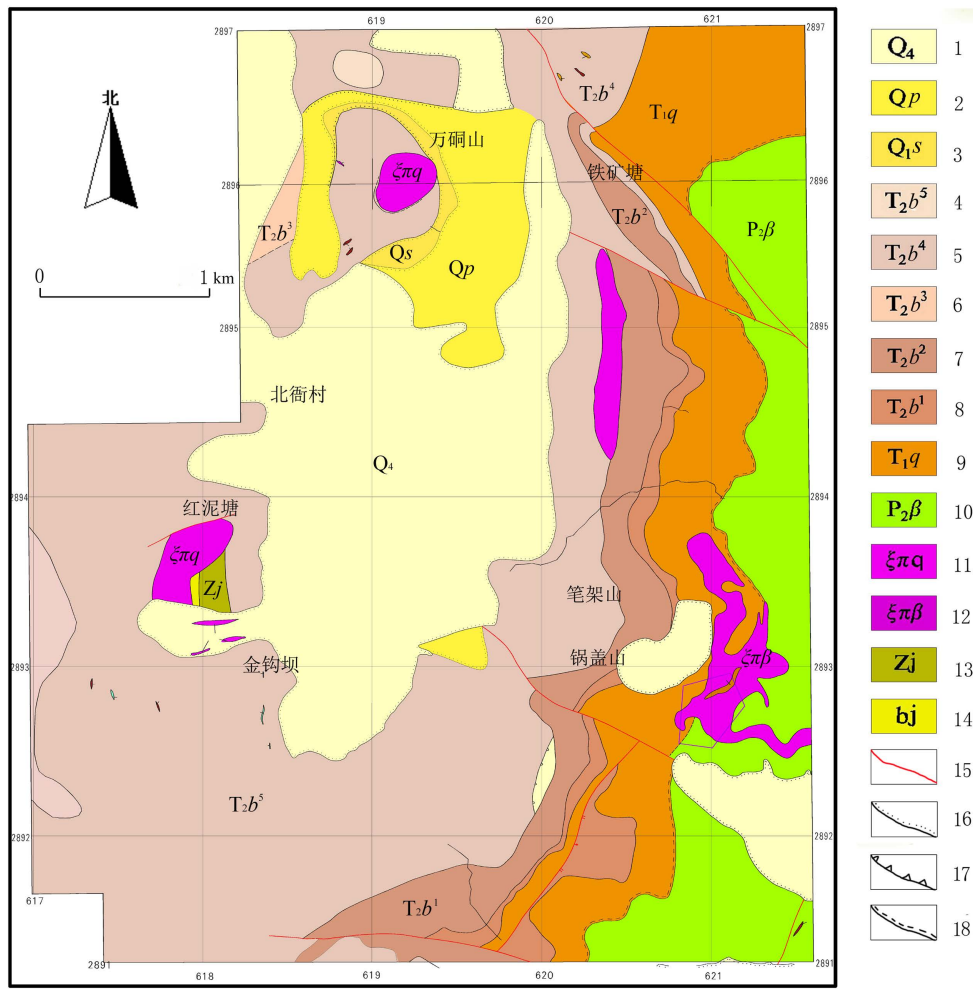


图1 北衙矿区地质图(据云南黄金集团公司提供)

1—残坡积层;2—砾石粘土岩;3—细砂岩;4—白云质灰岩;5—铁化砂屑灰岩;6—蠕虫状含泥质灰岩;7—泥质细晶灰岩夹薄层状泥质条带灰岩;8—似角砾状灰岩夹长石砂岩;9—砂岩;10—暗绿色玄武岩;11—灰白色石英正长斑岩;12—黑云母正长斑岩;13—震碎角砾岩;14—隐爆角砾岩;15—断层;16—地质界线;17—角度不整合地质界线;18—平行不整合地质界线

Fig.1 Geological map of the Beiya gold deposit

1—Quaternary; 2—Claystone; 3—Fine-sandstone; 4—Dolomite-limestone; 5—Calcarenite-vermicular-limestone; 6—Argillaceous-limestone; 7—Micrite; 8—Arkosic-sandstone; 9—Sandstone; 10—Basalt; 11—Quartz-syenite-porphry; 12—Syenite-porphry; 13—Shatter-breccia; 14—Cryptoexplosive-breccia; 15—Fault; 16—Geological boundary; 17—Angular unconformity; 18—Parallel unconformity

“+”字型、“L”字型、“T”字型等布极法。这些特点使得该方法成为探测深部地质信息、解决基底形态、隐伏构造、火山机构等地质问题的首选方法<sup>[3]</sup>。

高精度磁测方法利用岩石的磁化率差异来解决相关的地质问题。通常基性岩磁化率较高,酸性岩磁化率低,沉积岩基本无磁性,岩石蚀变区、断裂带、岩石接触带等地的磁化率与周围地质体差异较大。本区矿体产出北衙组碳酸盐岩与正长斑岩的内外接触带上,且为铁金伴生矿种,因此在该区应用高精度磁测能查明与矿体关系密切的构造、位置等。但此

方法体积效应严重,探测能力弱,垂向分辨率很低,因此,两种方法结合应用,优势组合,可以提高地球物理解决地质问题的可靠性和准确性<sup>[4-6]</sup>。

## 2 研究区地球物理特征

北衙铁金矿区矿石的物性特征(表1)显示:含金磁(褐)铁矿属强磁性体,灰岩、砂岩、石英正长斑岩属弱磁性体,风化红土、爆破角砾岩、玄武岩属中等磁性体。岩矿石有明显磁性差异,磁法工作探测目标含金磁(褐)铁矿具强磁性;红土、玄武岩具中

表1 北衙铁金矿区岩矿石物性特征统计  
Table 1 Rock physical properties of the Beiya gold deposit

参数 岩(矿)石名称	视电阻率 $\rho/(\Omega \cdot m)$		$\kappa/(4\pi \times 10^6)SI$		样品数/块
	变化范围	平均值	变化范围	平均值	
磁(褐)铁矿	19.6~3048	542.3	2249~167740	51570	42
石英正长斑岩	15.3~345.9	86.4	721~988	841	18
灰岩	829~5264.7	2597.5	2~1183	364	35
爆破角砾岩	98.9~531.3	258.2	9~21780	2835	27
构造角砾岩	305.4~1105.4	653.7	69~4780	3564	27
红土	39.9~246.6	147.3	651~9019	1.2	15
砂岩	794.4~5.46.2	2711.7	弱磁	弱磁	24
玄武岩	60~83	69	1239~58104	5147	18

等磁性,是本次磁法工作的主要干扰层。

磁(褐)铁矿属中阻高极化体,视电阻率( $\rho$ )平均值542.3  $\Omega \cdot m$ ,变化范围19.6~3048  $\Omega \cdot m$ ,充电率( $M$ )平均值7.4%,常见变化范围0.4%~20.6%,电阻率的高低与褐铁矿化的强弱有关,褐铁矿化强者电阻率低,反之则电阻率高,充电率的高低与黄铁矿化的强弱有关,黄铁矿化强者充电率高,反之则充电率低。斑岩属低阻低极化体,视电阻率( $\rho$ )平均值84.3  $\Omega \cdot m$ ,常见变化范围15.3~345.9  $\Omega \cdot m$ ,充电率( $M$ )平均值2.4%,常见变化范围0.3%~9.6%,电阻率的高低与长石的含量有关,长石含量高者电阻率低,反之则电阻率高,充电率的高低与黄铁矿化的强弱有关,黄铁矿化强者充电率高,反之则充电率低。灰岩属高阻低极化体,视电阻率( $\rho$ )平均值2597.5  $\Omega \cdot m$ ,常见变化范围829~5264.7  $\Omega \cdot m$ ,充电率( $M$ )平均值2.1%,常见变化范围0.8%~4.6%,电阻率的高低与岩石的破碎程度有关,岩石破碎者电阻率低,反之则电阻率高。爆破角砾岩、玄武岩、红土属低阻低极化体。这些物性的差异为大地电磁法、高精度磁测方法的应用奠定了基础<sup>[7-9]</sup>。

### 3 矿区平面磁异常基本特征

本区开展的磁测工作主要有1:20000磁法测量,并对重点区域进行加密,施行1:10000的磁法测量,测区总面积达23.08 km<sup>2</sup>。图2为本区 $\Delta T$ 异常平面图。由图可见,本区异常呈南北向拉伸分布,异常大小为-1800~3400 nT,由南向北,分布8处强磁异常区,见图中M1~M8编号,其中,M3异常规模最大,M2异常不完整。

图3为本区 $\Delta T$ 异常化极后提取的局部异常结果。由图可知,化极后异常整体北移,M3异常被分离为多个独立的异常,M8异常强度最大,经后期勘探验证,M8异常所在区域正是北衙金矿万洞山主矿段,目前正在露天开采的主矿区。

### 4 综合剖面勘查方法实验

为了验证笔者选择方法的有效性,笔者选择穿越M8磁异常布置了一条大地电磁测深(EH4)剖面(该剖面正是北衙金矿已知主矿段万洞山矿段48号勘探线,图3中黑线),进行综合实验,点距50 m。从大地电磁测深(EH4)卡尼亚电阻率 $\rho_c$ 断面等值线图(图4)可以清晰地看到,地层与石英正长斑岩体之间卡尼亚电阻率( $\rho_c$ )有明显的差异,灰岩段为高阻异常,古近—新近系、第四系为低阻异常。从48线大地电磁测深(EH-4)成果看,万洞山矿段深部有大范围石英正长斑岩体侵入,三叠系(碳酸盐岩)被切割成为捕虏体被岩体包裹,岩体侵入的部位主要在构造破碎带。含金磁(褐)铁矿体产于高、低阻过度带(中阻异常区),即石英正长斑岩体与三叠纪地层(碳酸盐岩)接触带或接触带附近。

在该剖面上又开展了1:5000高精度磁测(图5),磁法勘查在已知矿体上有高逾2000 nT的磁异常( $\Delta T$ ),异常带宽450 m, $\Delta T$ 极大值2256 nT;异常梯度西小、东大,以正异常为主,东部出现较小的负异常。人机二度半反演计算磁参数采用:有效磁化强度 $5000 \times 10^{-3} \sim 10000 \times 10^{-3} A/m$ ,有效磁化倾角 $90^\circ$ 。计算结果,推测磁性体与主矿体一致。

与已知勘探剖面的对比表明,此成果基本符合

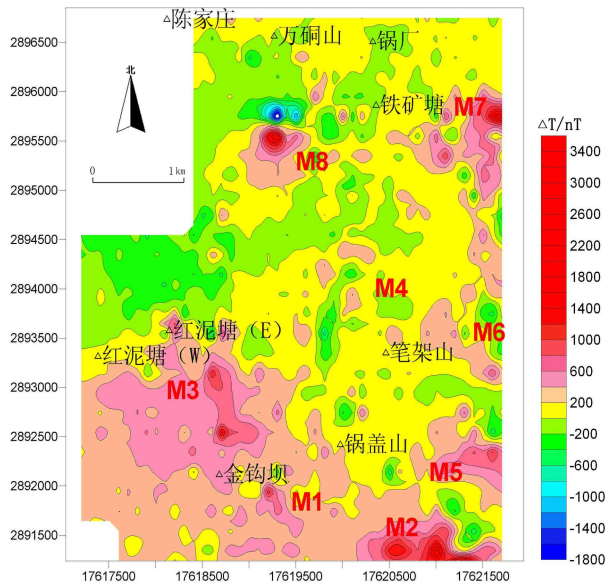


图2 北衙矿区 $\Delta T$ 异常平面图(1:25000)  
Fig.2 Magnetic anomaly map of the Beiya gold deposit(1:25000)

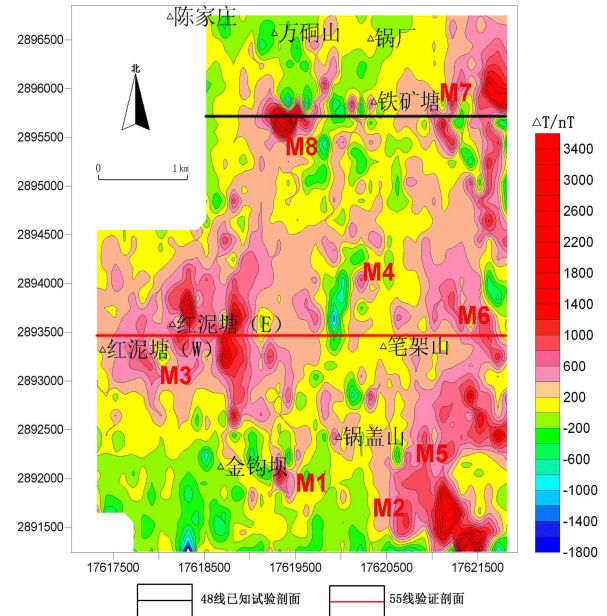


图3 北衙矿区 $\Delta T$ 异常化极后局部异常平面图(1:25000)  
Fig.3 Magnetic anomaly map of reduction to the pole for the Beiya gold ore district (1:25000)

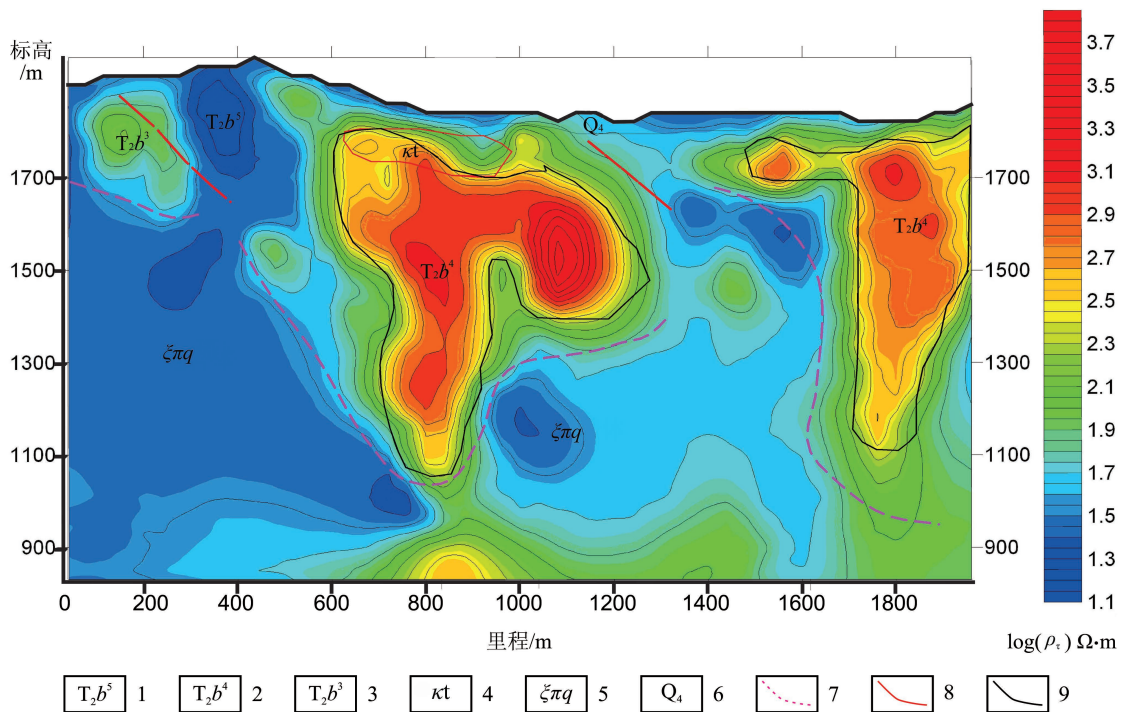


图4 48线EH4大地电磁二维反演断面图  
1—白云质灰岩;2—铁化砂屑灰岩;3—蠕虫状含泥质灰岩;4—矿体;5—石英正长斑岩;  
6—岩体界线;7—推测断层;8—实际断层;9—灰岩界线  
Fig.4 EH4 2D inversion cross-sectional map  
1—Dolomite-limestone; 2—Calcarenite-vermicular-limestone; 3—Argillaceous-limestone; 4—Ore;  
5—Quartz-syenite-porphry; 6—Quartz-syenite-porphry boundary; 7—Fault; 8—real fault; 9—Limestone boundary

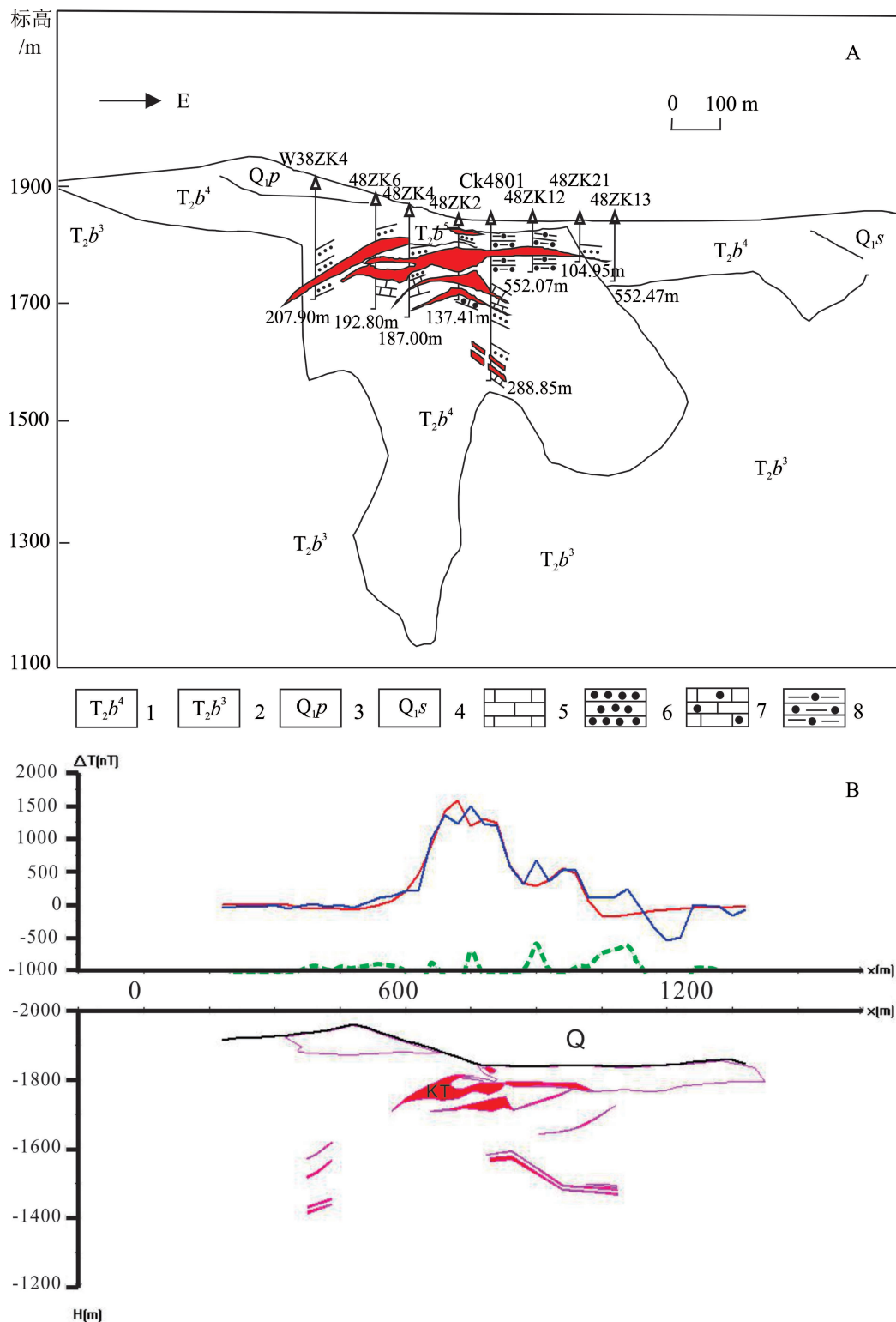


图5 48线勘探线剖面图(A)及磁异常2.5D反演结果(B)

1—铁化砂屑灰岩;2—蠕虫状含泥质灰岩;3—砾石粘土岩;4—细砂岩;5—铁化砂屑灰岩;6—蠕虫状含泥质灰岩;  
7—泥质细晶灰岩夹薄层状泥质条带灰岩;8—灰白色石英正长斑岩

Fig.5 Geological section along No. 48 exploration line (A) and 2.5D magnetic anomaly inversion map (B)

1—Calcarenite vermicular limestone; 2—Argillaceous limestone; 3—Claystone; 4—Fine sandstone;  
5—Calcarenite vermicular limestone; 6—Argillaceous-limestone; 7—Micrite; 8—Quartz-syenite porphyry

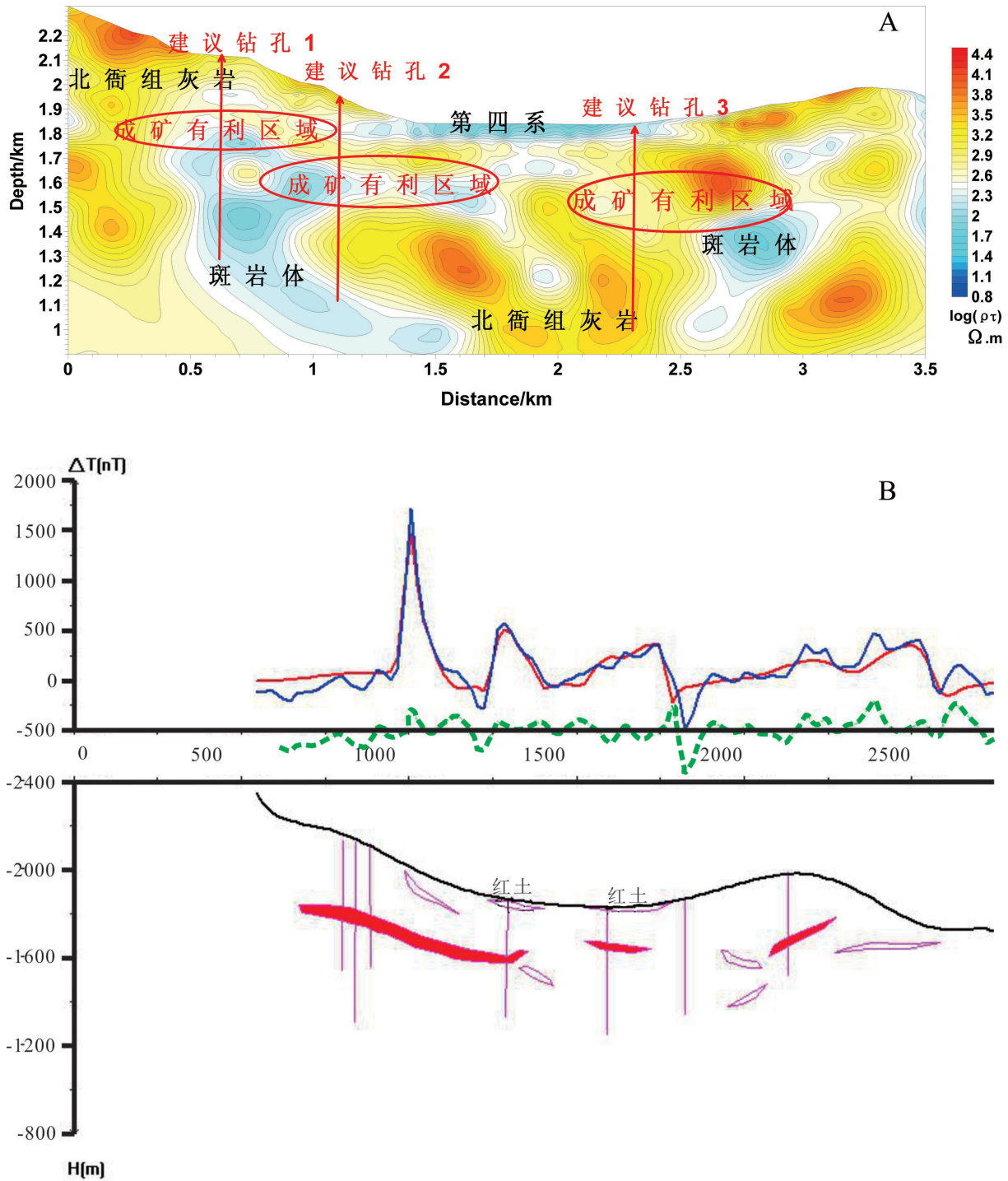


图6 55线EH4大地电磁二维反演断面图(A)及磁异常2.5D反演结果(B)  
 Fig.6 EH4 2D inversion cross-sectional map (A) and 2.5D magnetic anomaly inversion map (B)  
 along No. 55 exploration line

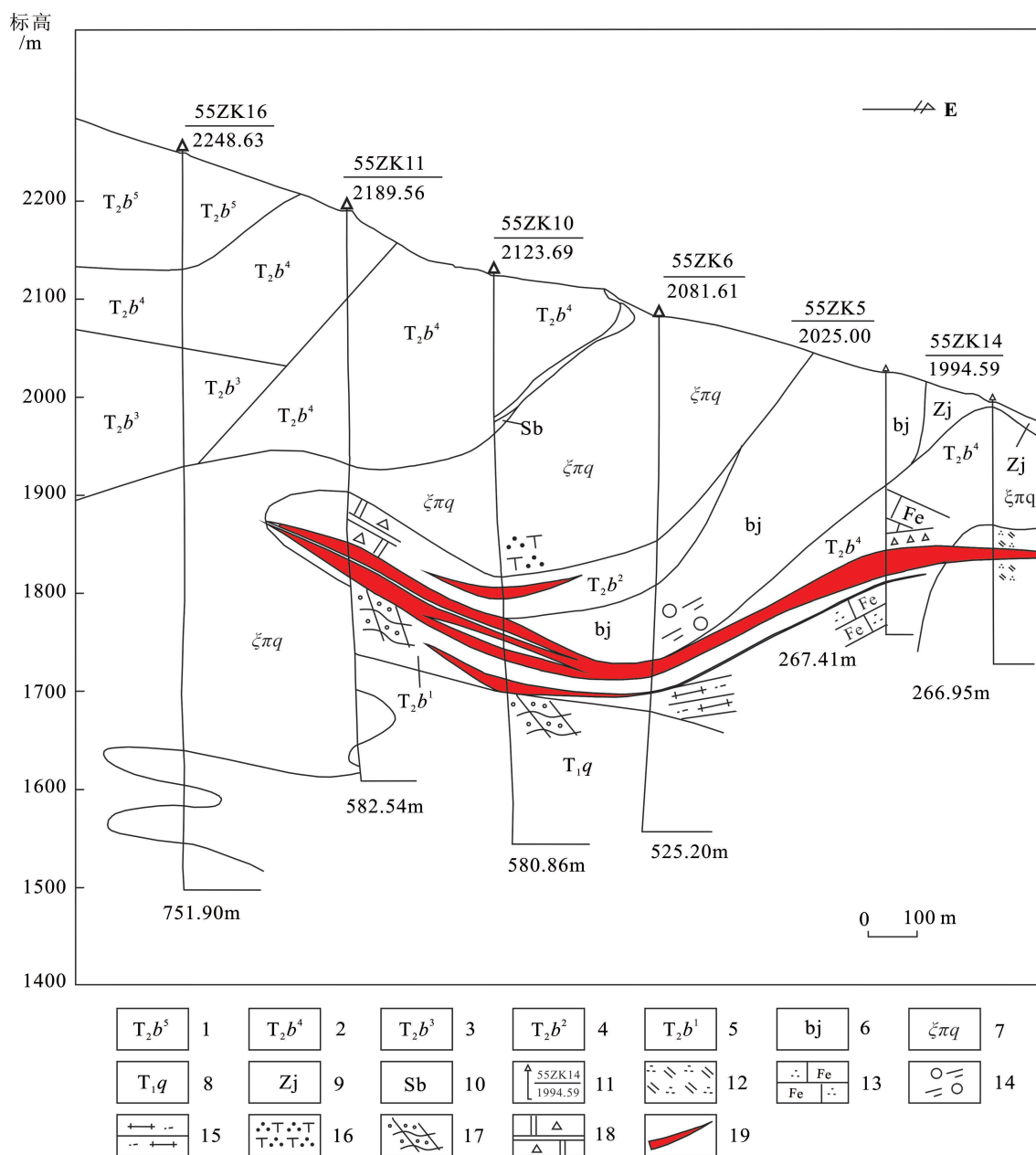


图7 55线勘探线剖面图

- 1—白云质灰岩;2—铁化砂屑灰岩;3—蠕虫状含泥质灰岩;4—泥质细晶灰岩夹薄层状泥质条带灰岩;  
 5—似角砾状灰岩夹长石砂岩;6—隐爆角砾岩;7—灰白色石英正长斑岩;8—砂岩;9—震碎角砾岩;10—角砾岩;  
 11—钻孔编号及井深;12—石英二长斑岩;13—铁化砂屑灰岩;14—构造角砾岩;15—含砂砾粘土岩;  
 16—石英正长斑岩;17—砂砾岩;18—角砾状大理化灰岩;19—矿体

Fig. 7 Geological section along No. 55 exploration line

- 1—Dolomite limestone; 2—Calcarenite vermicular limestone; 3—Argillaceous limestone; 4—Micrite; 5—Arkosic-sandstone;  
 6—Cryptoexplosive breccia; 7—Quartz-syenite porphyry; 8—Sandstone; 9—Shatter breccia; 10—Breccia; 11—Drill hole;  
 12—Quartz-monzonite porphyry; 13—Calcarenite-vermicular limestone; 14—Structural breccia; 15—Clayrock;  
 16—Quartz syenite porphyry; 17—Sandy conglomerate; 18—Brecciated marbleized limestone; 19—Orebody

当地的地质、矿产特征。表明了该方法组合的有效性,同时两种方法在多方面的相互验证,也增加了成果解释的可信度<sup>[10-11]</sup>。

## 5 矿区外围应用实例

根据48勘探线实验成果,对红泥塘M3磁异常进行分析,穿越该异常布置了一条综合剖面(图3中红线),开展1:5000高精度磁测以及大地电磁测深(EH4),点距50 m。二维反演结果显示电阻率西低东高,等值线形态似条带状或块状分布,可见向斜构造。剖面左端即地理位置西侧,里程0~1.2 km,对应高程1.9 km以上,电阻率属于中阻分布范围在300~800  $\Omega \cdot m$ ,呈条带状分布,其下部则显示为大块低阻分布范围在100  $\Omega \cdot m$ 以下,中部一椭圆中低阻(约为150~200  $\Omega \cdot m$ )穿插于内,推测此处由北衙组灰岩或斑岩体所引起的异常。里程1.2~2.4 km段,地表电阻率为低阻为第四系泥土层覆盖,下部则反映为整块的高阻异常体,为北衙组灰岩所致,将该异常体分为上下部分,高程1.6~1.8 km为上部,高阻体异常基本呈条带状,阻值分布在350~1000  $\Omega \cdot m$ ,高程1.6 km以下则是连续性较好、扭曲的带状高阻异常体,电阻率400~3500  $\Omega \cdot m$ ,上部高阻体与下部高阻体中间还零星包着小椭圆型的中、低阻异常体,推测由围岩较强的挤压所引起的破碎带。里程2.4~3.4 km段,地表电阻率显示高阻,实地测量该处灰岩出露,中下部有一宽约200 m“<”型中、低阻异常带,推断为断层所引起的(含水)破碎带。根据已知勘探剖面48线的实验成果,认为矿体产出在高低阻过渡带附近,也就是斑岩体与北衙组灰岩的内外接触带附近,因此推断了3个成矿有利区域,见图6。

另外,该剖面上1:5000高精度磁测显示在大地电磁推断成矿有利区域有高逾2000 nT的磁异常( $\Delta T$ ),异常带宽300 m左右。

通过大地电磁和高精度磁测成果,对照地质资料,在该剖面上建议了3个钻孔,后经工程验证,在1号建议钻孔下180.7 m深度处遇26.2 m厚的矿体;2号建议钻孔下在251 m深度处遇约15.2 m厚的矿体;具体矿体模型见55号勘探线剖面(图7)。

## 6 结论

在北衙铁金矿地区,利用地面高精度磁测可

大致圈定矿体、岩体范围,识别大的构造,但无法识别矿体具体的空间展布,垂向分辨率不足,利用大地电磁方法可有效探测深部有利的控矿地段、矿体的空间位置。大地电磁、高精度磁测两种方法的优势互补,可较好地解决北衙铁金矿地区深部探测的相关找矿地质问题,为矿区外围勘查提供了有力手段。

**致谢:**感谢云南黄金集团公司对本项目的支持,提供各种图件、材料;感谢和中华副总工程师、王从明工程师、曾琴琴博士、王桥工程师在此次工作中给予的指导帮助。

## 参考文献(References):

- [1] 张学书. 滇西北衙红土型金矿特征及其找矿前景[D]. 昆明: 有色总公司西南地勘局, 2000.  
Zhang Xueshu. Metallogenesis of the Beiya Laterite Gold Deposit and its Prospecting, West Yunnan[D]. Kunming: Southwest Yunan Geosurvey Bureau, 2000(in Chinese with English abstract).
- [2] 徐兴旺, 蔡新平, 张宝林, 等. 滇西北衙金矿矿床类型与结构模型[J]. 矿床地质, 2007, 6(3): 249-253.  
Xu Xingwang, Cai Xinping, Zhang Baolin, et al. Genetic types and framework model of Beiya gold ore district in western Yunnan[J]. Mineral Deposits, 2007, 6(3): 249-253(in Chinese with English abstract).
- [3] 孙升林, 倪新辉, 龚惠民, 等. EH4电磁成像系统在中西部岩溶区地下水勘查中的应用[J]. 中国煤田地质, 2001, 9(13): 67-72.  
Sun Shenglin, Ni Xinhui, Gong Huimin et al. Applications of EH4 electromagnetic imaging system on exploration of underground water in karst region of central-western China[J]. Coal Geology of China, 2001, 9(13): 67-72(in Chinese with English abstract).
- [4] 刘祜, 程纪星, 腰善丛, 等. 电、磁综合方法在南方硬岩型铀矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2011, 12(6): 739-743.  
Liu Hu, Cheng Jixing, Yao Shancong, et al. The application of integrated geophysical methods composed of AMT and magnetic survey to the exploration of hard rock-hosted uranium deposits in southern China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 12(6): 739-743(in Chinese with English abstract).
- [5] 窦喜英, 吴燕冈, 王恩利, 等. 重磁对应分析方法在东北地区实际资料处理中的应用[J]. 吉林地质, 2006, 25(2): 42-47.  
Kou Xiyi, Wu Yangang, Wang Enli, et al. The application of correspondence analysis method of gravity and magnetic anomalies in the process of factual data, in northeast China [J]. Geology in Jilin, 2006, 25(2): 42-47(in Chinese with English abstract).
- [6] 邵振华, 张凤旭, 吴燕冈. 道郎和都格地区重磁场特征与找矿远景[J]. 物探与化探, 2011, 12(6): 762-765.  
Tai Zhenhua, Zhang Fengxu, Wu Yangang. Gravity and magnetic



- field characteristics and ore-search prospect districts in Daolang and Duge area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 12(6): 762-765(in Chinese with English abstract).
- [7] 吴华, 徐兴旺, 莫新华, 等. 东天山白石泉矿区地球物理多方法联合探查与隐伏铜镍矿定位预测[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 672-681.  
Wu Hua, Xu Xingwang, Mo Xinhua, et al. Exploration by combined geophysical methods and location prediction of buried Cu-Ni deposits in the Baishiquan area, eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 2006, 33(3): 672-681(in Chinese with English abstract).
- [8] 于昌明. CSAMT方法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(1): 133-138.  
Yu Changming. The application of csamt method in looking for hidden gold mine[J]. *Chinese J. Geophys.*, 1998, 41(1): 133-138(in Chinese with English abstract).
- [9] 王桥, 万汉平, 王闻文. 综合物探方法在铝土矿勘查中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2012, 27(2): 331-335.  
Wang Qiao, Wan Hanping, Wang Wenwen. The application of integrated geophysical exploration in Bauxite[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(2): 231-235(in Chinese with English abstract).
- [10] 陈伟军, 刘红涛. 综合地球物理方法在隐伏矿床勘查中的应用——以内蒙赵家围子银铅锌多金属矿床为例[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(1): 364-368.  
Chen Weijun, Liu Hongtao. Integrated geophysical exploration for concealed ore beneath cover in the Zhaojiaweizi area, Inner Mongolia, northern China[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(1): 364-368(in Chinese with English abstract).
- [11] 郝天珧, 江为为. 综合地球物理方法在山东百里店地区找寻隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(S1): 404-413.  
Hao Tianyao, Jiang Weiwei. Application of comprehensive geophysical methods in looking for hidden gold mine in bailidian region[J]. *Chinese J. Geophys.* 1998, 41(S1): 404-413(in Chinese with English abstract).

## The application of integrated geophysical methods of magnetic survey and AMT to the exploration of the Beiya gold deposit

YANG Jian<sup>1,2</sup>, WANG Xu-ben<sup>1</sup>, WANG Yong-hua<sup>2</sup>, WANG Qiao<sup>2</sup>, ZENG Qin-qin<sup>2</sup>

(1. School of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

2. Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081, Sichuan, China)

**Abstract:** The Beiya gold deposit is located in southwest Sanjiang alkali porphyry belt with complex geological structure, well-developed Variscan marine basalt and Himalayan alkali-rich porphyry. The Variscan marine basalt generally contains the hydrothermal mineralization, whereas the Himalayan alkali-rich porphyry has a close relationship with gold, iron, lead, zinc, silver. With the Beiya iron gold deposit as the study object, the authors utilized the magnetic anomalies delineated by high resolution magnetic survey in combination with audio magnetotelluric method, (the two methods are mutually complementary), followed the principle of "from known to unknown", and depended on geological data. As a result, deep geological structure and spatial location of the orebody were detected, which can provide a strong guidance for the project layout.

**Key words:** Beiya gold deposit; high resolution magnetic survey; AMT

**About the first author:** YANG Jian, male, born in 1983, doctor candidate, engineer, engages in geophysical prospecting; E-mail: 115138871@qq.com.