

DOI:10.19826/j.cnki.1009-3850.2020.10002

特提斯喜马拉雅铅锌铋金成矿带含炭质岩石中 热液脉型矿床的综合电法勘探 ——以西藏扎西康铅锌铋多金属矿为例

郭 镜^{1,2}, 焦彦杰¹, 梁生贤^{1*}

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要:扎西康铅锌铋多金属矿床产于特提斯喜马拉雅炭质板岩的断裂带内,是特提斯喜马拉雅铅锌铋金成矿带内典型的热液脉型矿床。由于含炭质岩石和金属硫化物都呈现出相似的低阻高极化电性特征,加之热液脉型矿床的矿体普遍较小,使得在含炭质岩石中对金属硫化物矿体进行电法勘探存在较大困难。本文通过对扎西康矿床已知矿体的音频大地电磁测深和激电中梯测量,发现矿区的炭质板岩呈现低电阻率($10^{-0.4} \sim 10^0 \Omega \cdot m$)和高极化率(9%~20%)特征,而矿体呈现出高电阻率($10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot m$)和低极化率(1%~5%)的特征。经研究分析,认为造成这种现象的原因有两方面:(1)扎西康炭质板岩中的炭质物质量分数平均为0.79%,变质温度约在 $300 \pm 25^\circ C \sim 340 \pm 25^\circ C$,炭质物电阻率为 $6.1 \times 10^{-5} \sim 6.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot m$,显示极好的导电性;此外,炭质板岩中存在大量黏土矿物,黏土矿物的吸水性促进了炭质物的连通性,因此炭质物高导电性与连通性的耦合使得炭质板岩呈现低阻高极化电性特征;(2)扎西康矿床的脉型矿体除包含金属硫化物外,还产出大量的脉石矿物,脉石矿物普遍具有高阻低极化电性特征,是造成整个矿体在炭质板岩中呈现高阻低极化异常的根本原因。据此,本文提出在炭质板岩中通过识别脉石矿物引起的高阻低极化异常带间接找矿的新思路,相应的技术方法组合为:利用激电中梯测量定位高阻低极化带的平面位置,再利用音频大地电磁测深探测其深部产状。

关键词:含炭质岩石;热液脉型矿床;电法勘探;特提斯喜马拉雅;扎西康铅锌铋多金属矿
中图分类号:P618.2;P631.3 **文献标识码:**A

0 序言

含炭质岩石因其较强的还原能力,对金属矿化起着重要影响(Poub and Křibek, 1986; Gorzhevskiy, 1987)。硫酸盐与有机质形成的还原硫,基本上被定义为许多金属的大吸收器:形成金属硫化物后直接沉淀,与金属硫化物共沉淀或还原非亲铜元素(Disnar and Sureau, 1990)。在找矿手段匮乏的年代,甚至把炭质层称之为“黑色引导”或“标志”(罗镇宽, 1984)。此外,在反映成矿外部环境变化方面,炭质也具有很高的灵敏性(Абаулина et al.,

1988)。

特提斯喜马拉雅地块内有着大量的高炭质物含量的沉积变质岩,如中一下三叠统吕村组(>2100m)、涅如组(>4500m),侏罗系日当组(>900m)等地层。在后碰撞阶段,总体上青藏高原地壳应力以伸展为特征(侯增谦等, 2006)。位于藏南拆离系和雅鲁藏布江缝合带之间的特提斯喜马拉雅地块(Yin and Harrison, 2000),在25Ma以来发育了一系列的构造-热事件,如侵位于特提斯喜马拉雅片麻岩穹窿带的淡色花岗岩(Searle et al., 1997; 梁维等, 2020; 张志等, 2020),南北向及东西向伸展

收稿日期: 2020-10-11; 改回日期: 2020-10-20

作者简介: 郭镜(1985—),男,高级工程师,主要从事勘探地球物理方向研究。E-mail:313756811@qq.com

通讯作者: 梁生贤(1984—),男,高级工程师,主要从事重磁电勘探与研究。E-mail:313058798@qq.com

资助项目: 四川省科技计划项目应用基础研究面上项目(2019YJ0269); 西藏山南地区钨锡多金属矿调查评价(DD20190147); 国家自然科学基金青年基金“含炭质岩石的电性干扰及其找矿意义研究——以扎西康铅锌铋多金属矿为例”(41604118)

断裂等(图1; Burg et al., 1984; Hodges et al., 1992; Hodges, 2000)。在这些构造-热事件发育过程中, 特提斯喜马拉雅形成了众多热液脉型的铅锌锡金多金属矿床(侯增谦等, 2006), 如沙拉岗锡矿床、得龙锡矿床、马扎拉金矿床、哲古锡金矿床、壤拉锡矿床、车穷卓布锡矿床、查拉普金矿床、吉松铅锌矿床、扎西康铅锌锡金多金属矿床等(图1; 孟祥金等,

2008; 张建芳, 2010; 郑有业等, 2007, 2014; 张进江等, 2011)。其中, 很多矿床赋存于含炭质岩石中, 如查拉普金矿(郑有业等, 2007)、折木朗金矿(周峰等, 2011)、邦布金矿(韦慧晓等, 2010)、扎西康铅锌锡多金属矿(梁维等, 2015)等。因此, 特提斯喜马拉雅铅锌锡金成矿带是开展含炭质岩石中热液脉型矿床电法勘探的天然试验场。

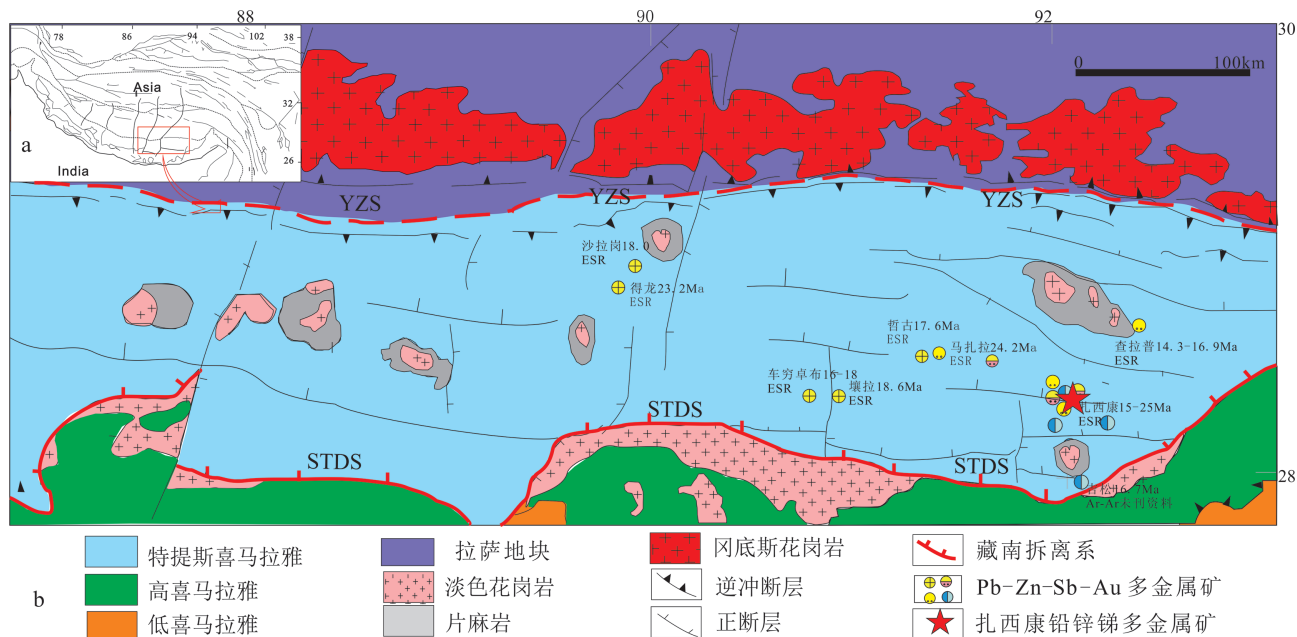


图1 特提斯喜马拉雅地质矿产简图(图据张进江等, 2011 修改; 数据据孟祥金等, 2008; 张建芳, 2010; 郑有业等, 2007, 2014)
Fig. 1 Schematic map of geology and mineral resources of the Tethyam Himalaya (modified from Zhang et al., 2011; data from Meng et al., 2008; Zhang et al., 2010; Zheng et al., 2007, 2014)

沉积岩岩石成因的研究表明, 含炭质岩石一般由原始的腐殖质型炭质地层遭受变质而成。含有有机质的沉积岩在埋深过程中, 有机质随着变质程度加深, 向石墨方向演化(Durand and Monin, 1980)。炭质物的石墨化过程, 是芳香层有序堆叠和排除杂原子的过程(Oberlin et al., 1980), 这两个过程随着岩石变质程度加强而相辅相成的进行(Buseck et al., 1985), 使得炭质物自由电子增多, 导电性增强(莫如爵等, 1989)。含炭质岩石的导电性随着其内炭质物导电性的增强而增强, 常与金属硫化物一样表现为低阻高极化特征。已有研究表明, 特提斯喜马拉雅铅锌锡金成矿带内热液脉型矿体的体积普遍较小, 难以引起较大的电性异常。以上两方面因素使得在含炭质岩石中对热液脉型矿体进行电法勘探存在较大困难。

本文以西藏扎西康铅锌锡多金属矿为例, 通过

音频大地电磁测深和激电中梯测量等电法勘探, 发现矿区呈现低阻高极化背景, 矿体赋存位置呈现高阻低极化背景, 且矿体所在区域有显著的铅锌元素异常。结合炭质物含量分析、拉曼光谱、碳同位素、炭质物四探针电阻率测试、高分辨率透射电镜等测试分析方法, 本文从炭质物含量、性质和连通性等方面, 研究含炭质岩石的电性特征, 为合理解释扎西康矿体呈现高阻低极化特征提供依据, 也为特提斯喜马拉雅铅锌锡金成矿带内含炭质岩石中热液脉型矿床的地球物理勘探提供新的思路和技术支撑。

1 矿床地质背景

扎西康铅锌锡多金属矿是特提斯喜马拉雅铅锌锡金成矿带内唯一的大型-超大型矿床(图2a; 郑有业等, 2012)。矿体呈脉状(倾向西, 倾角 $45^{\circ} \sim$

70°;图 2b)赋存于侏罗系日当组的断裂构造带内。主要矿脉为南北向的Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ及北东向的Ⅶ和Ⅷ(图 2a),以及 2015 年探得的 Ve 矿体,储量超过 140 万吨。Ⅴ号矿体品位最高且储量最大,超过 100 万吨(郑有业等,2012)。含矿热液来源主要为岩浆热液、地层建造流体和大气水(孟祥金等,2008; Zhou et al., 2017),三者的混合造成了矿质沉淀(李应棚

等,2015)。成矿时间为青藏高原后碰撞伸展成矿期(梁维等,2015; Sun et al., 2018),且主要分为两期,以铅锌为主的成矿期和铋成矿期。

日当组为一套互层状的深灰色—灰黑色页岩、钙质页岩,含泥灰岩、砂岩、凝灰岩,夹泥质灰岩和燧石团块,总厚度大于 900m,属深水相沉积,经低级变质后形成了炭质板岩(梁维,2014)。

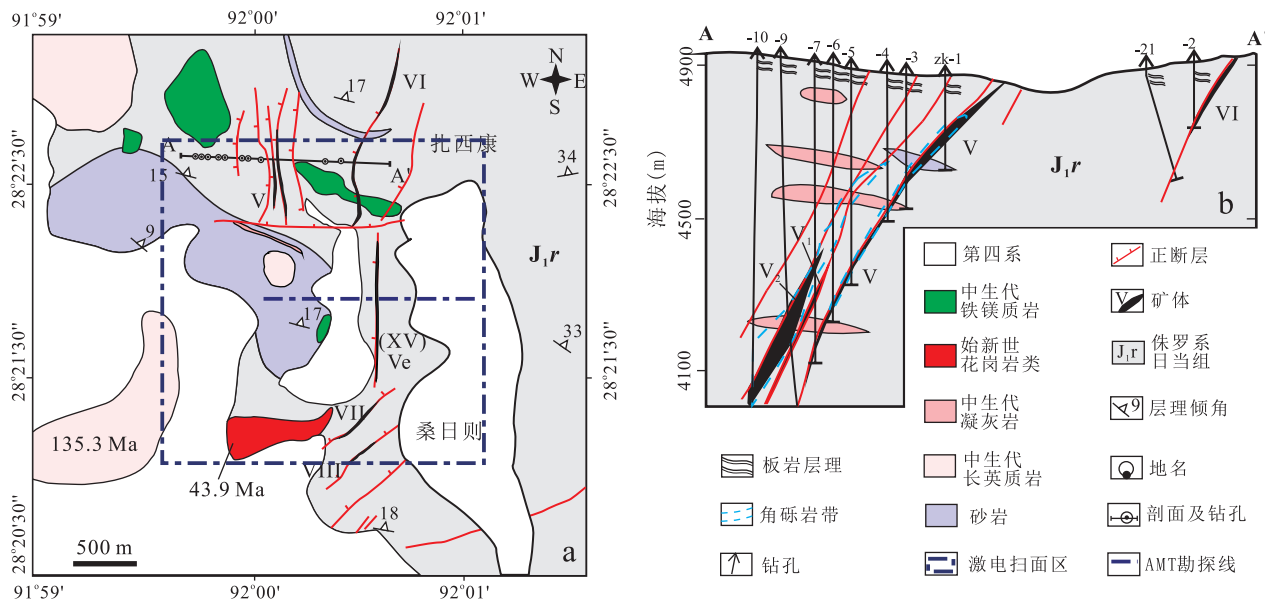


图 2 扎西康矿集区地质简图(a)和铅锌矿体剖面图(b)(据 Zhou et al., 2017 修改)

Fig. 2 Geological map of Zhaxikang mining area (a) and profile of lead-zinc ore bodies (b) (modified from Zhou et al., 2017)

2 方法

2.1 AMT 的数据采集与处理

AMT 数据采用加拿大凤凰公司研制的 V5 系列仪器采集完成,基准点距 50 m,剖面长度 2.3 km,数据处理时最低频率截取到 1Hz。由于测区位于西藏农牧区,无明显干扰源,因而各测点数据质量高。AMT 数据处理与二维反演的相关算法及技术成熟,数据处理包括极化模式判别(严良俊等,2001)、静态校正(王家映,1992)等,二维反演解释有快速松弛(RRI)(Smith and Booker, 1991)、OCCAM(Constable et al., 1987)和共轭梯度反演(Rodi and Mackie, 2001)等方法。本次 AMT 数据反演通过与钻孔工程以及已知地质认识对比,发现 Zongmt 软件中的 Smoothness constrained 反演结果更能表达地电断面的真实情况。因此,AMT 数据二维反演采用 Smoothness constrained。

2.2 激电中梯面积测量的数据采集与处理

激电数据采用重庆奔腾大功率激电仪采集完成,数据密度为 1:1 万网度(线距 100 m,点距 40 m),约 9 km²,其中,发射极距 1500 m,供电电压大于 500 V,供电电流 > 5 A,一次场大于 100 mV。激电数据采用视极化率和视电阻率成图分析。

2.3 炭质物含量的测试分析

炭质物含量的测试采用高频红外法,该方法相对于重铬酸钾氧化法等传统的炭质物测定方法,具有精度高、操作简便、分析快速等优势(酆新和王笑笑,2013)。经酸试剂处理掉样品中的无机碳,干燥后置于高频红外碳硫仪中,在富氧条件下,利用高频振荡感应燃烧(邹芳,2014),保证炭质物被充分氧化成 CO₂,其在 4.26 μm 处具有很强的红外特征吸收(谢复新,1987; Sandford and Allamandola, 1990),符合朗伯比尔定律,通过测量光强度的变化就能换算出 CO₂的含量,进而得出炭质物的含量(顾涛等,2015)。

2.4 拉曼光谱的测试分析

由于拉曼光谱对碳材料中原子结构的改变很灵敏,拉曼光谱对于理解各种炭质物的微观结构有良好效果(Wilhelm et al., 1998; Beyssac et al., 2003)。炭质物的一阶拉曼光谱存在两个拉曼特征主峰:D 峰(1370 cm^{-1})和 G 峰(1583 cm^{-1}),高度有序、无缺陷的石墨样品只有 G 峰,结构有序度差的石墨样品则会诱导出 D 峰。且无论石墨存在何种形式的无序,D 峰都会出现(Wang et al., 1990)。炭质物拉曼特征峰,则可作为炭质物结构的评价参数,且前人依此开展了众多卓有成效的研究。

本文使用 Nicolet Almega XR(Thermo Scientific, Yokohama, Japan)以 532 nm Nd-YAG 激光通过共焦显微镜,以 100 为准,使用准粒子散射几何获得炭质物的拉曼光谱。样品表面的激光功率设定为 5 mW 。散射光通过背散射几何形状采集,具有 $25\text{ }\mu\text{m}$ 针孔和全息陷波滤波器,最后使用 2400 线/mm 光栅分散,并通过 256×1024 像素的 Peltier 冷却 CCD 探测器进行分析(Andor Technology, Belfast, Northern Ireland)。空间分辨率约为 $1\text{ }\mu\text{m}$,波数分辨率约为 1 cm^{-1} 。通过监测来自 Ne 灯的等离子体线的位置来校准拉曼频带的频率。每个样品测量至少 3 个不同的炭质物颗粒。

2.5 炭质物提取及碳同位素测试

鉴于沉积岩中炭质物浓度较低,我们采用化学萃取法制备所需的炭质物样品等分试样。原料中硅酸盐或氧化物矿物的存在可在高温下形成各种碳化物,因此通过化学萃取尽可能多地消除这些矿物质是必要的。

将岩石样品($500 \sim 800\text{ g}$)用颚式破碎机破碎并使用孔径为 $74\text{ }\mu\text{m}$ 筛网筛分。最初用 2 mol/L HCl 处理筛分的粉末以除去碳酸盐、硫化物、硫酸盐和氢氧化物,然后在几个大的聚四氟乙烯容器(500 ml)中用 $\text{HF}(48\%)$ 处理该溶液并在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的热板上干燥。聚四氟乙烯容器中的干残留物由炭质物和新形成的氟化物如陨石和其他复合氟化物组成。这些氟化物一旦沉淀就难以再溶解,它们会干扰炭质物的进一步分析,因此,我们在酸处理之前用热去离子水重复冲洗。将残余物在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下再次溶解在 2 mol/L HCl 中。重复化学处理数次,直到炭质物漂浮在溶液中。过滤炭质物的上清液并在表面皿上干燥。需说明的是,即使经过 HF-HCl 酸处理,

炭质物残留物仍保留少量矿物质,如锆石,金红石,钛铁矿和黄铁矿。已有研究表明, HF-HCl 酸处理不会改变炭质物结构,也不会产生新形成的溶剂可溶性有机物质,除非是非常不成熟的沉积物。

对提纯的炭质物在同位素比值质谱仪中进行碳同位素测试,EA 载气流速: 180 ml/min ;参考气流速: 70 ml/min ;反应管温度: $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.6 电阻率四探针测试

对提纯的炭质物粉末进行压实处理后,用四探针法进行电阻率测试。该方法由于原理简单、精度高及操作简便,是测试半导体材料电阻率或电导率的首选方法之一。让四根等距(1 mm 左右)探针竖直的排成一排,同时施加适当的压力让其压在样品的表面上以形成欧姆接触,样品相对探针距可理想地视为无限大。利用恒流源给两个外探针 1、4 通以小电流,电流值由被测样品电阻率范围确定,然后用高输入阻抗精准电压表测量两个中间探针 2、3 上的电压降。根据厚块原理和薄层原理推导的理论公式即可计算出样品的电阻率,此即为常规四探针法的测试原理(李建昌等,2011)。

2.7 高分辨率透射电镜

有机物在沉积、埋深的过程中向石墨化方向演化。主要分为两个方面:杂原子的排出和碳层堆的堆叠。杂原子的排出可以通过碳同位素进行描述。碳层堆在从一维杂乱结构,向三维石墨结构演化的过程中形成可探测的纹理结构。本次试验采用 JEOL2100 透射电子显微镜,把岩石样品制备成厚度 $<100\text{ nm}$ 的薄片放入电镜中拍照。以 6000 、 30000 、 100000 、 400000 的不同放大倍数拍摄样品的形貌照片,观察炭质物的纹理结构。

3 结果与讨论

3.1 扎西康炭质板岩中的电法勘探

激电中梯测量发现矿区呈现高的极化率背景(图 3a),约为 $9\% \sim 20\%$,而矿体位于低极化率条带中,约为 $1 \sim 5\%$,极化率高值区的钻孔不含矿。激电中梯测量可以在平面上把矿脉定位于宽度 $n \times 100$ 米内的低极化率条带内。矿脉的地下产状则通过音频大地电磁测深来进行分析。由图 3c 可知,深部呈现低的电阻率背景值,约为 $10^{0.4} \sim 10^0\text{ }\Omega \cdot \text{m}$ 。矿体位于高视电阻率区域。且宽度 250 m 的高视电阻率区域与低视极化率条带位置较吻合。

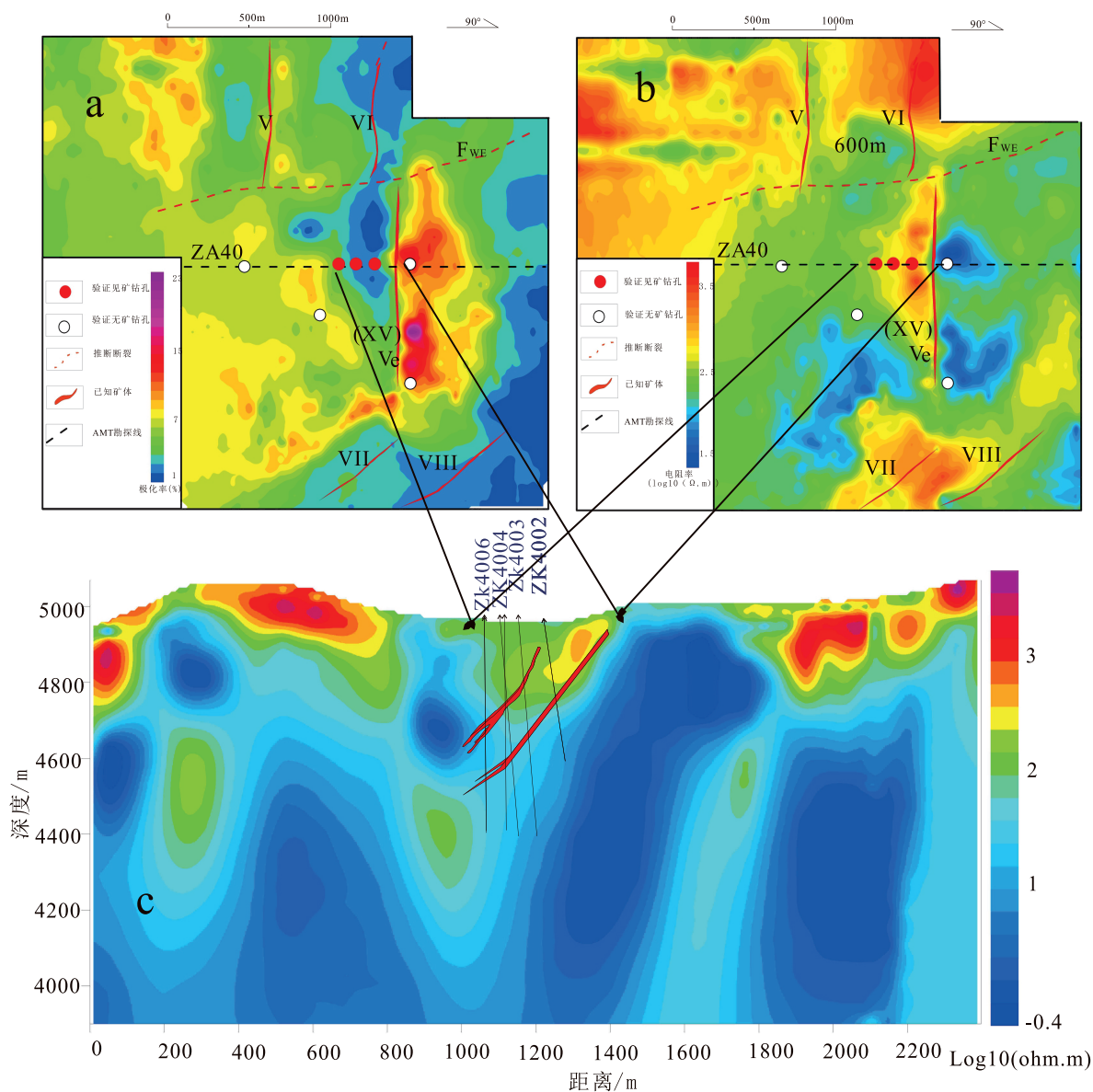


图3 扎西康炭质板岩中的电法勘探结果图

a. 大功率激电中梯扫面视极化率图; b. 大功率激电中梯扫面视电阻率图; c. 音频大地电磁测深剖面图

Fig. 3 Results of electric prospecting of carbonaceous rocks in Zhaxikang mining area

3.2 扎西康炭质板岩低阻高极化背景研究

通过对扎西康 ZK406 钻孔的岩心进行 XRD 分析得知,岩石中含有约三分之一的黏土矿物(表1),黏土矿物成分主要以高岭石为主(表2)。黏土矿物的存在,使得含炭质岩石极易锁住地层水分。

通过对扎西康 ZK406、ZK4006 钻孔中所取的炭质板岩样品进行高温燃烧法测量,得出岩石中的炭质物质量分数为 0.58% ~ 1.15%,平均为 0.79% (表3;作者已发表数据是约 2%,经重新测试认为 0.79% 为准确数据,在此更正;郭镜等,2019)。实验测得炭质物电阻率在 $6.1 \times 10^{-5} \sim 6.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$

之间,显示极好的导电性(表3),质量分数为 0.7% 的炭质物足以使变质岩的电阻率降低一个数量级 (Léger et al., 1996)。通过炭质物拉曼特征峰,依据经验公式 (Beyssac et al., 2002; Yui et al., 2014),计算扎西康炭质板岩的变质温度约在 $300 \pm 25^\circ\text{C} \sim 340 \pm 25^\circ\text{C}$ 之间(图4),且变质温度随深度增加而增加。根据炭质物的密度大多在 $1.4 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ 之间,而扎西康炭质板岩的密度约为 2.7 g/cm^3 (郭镜等,2019),可以把炭质物 0.79% 的质量分数换算为 1.49% 的体积分数,这相当于在岩石中注入了 1.49% 的离子水溶液。

表 1 扎西康炭质板岩主要矿物成分含量表

Table 1 Contents of main minerals in carbonaceous slate in Zhaxikang mining area

样品编号	石英(%)	方解石(%)	白云石(%)	黏土矿物(%)
406-15	7	61	1	31
406-45	13	54	4	26
406-66	14	49	2	35

表 2 扎西康炭质板岩主要黏土矿物成分含量表

Table 2 Contents of main clay minerals in carbonaceous slate in Zhaxikang mining area

样品编号	蒙皂石(%)	伊利石(%)	高岭石(%)	绿泥石(%)	伊/蒙混层(%)	绿/蒙混层(%)
406-15	0	23	58	17	2	0
406-45	0	31	52	13	4	0
406-66	0	14	71	14	1	0

表 3 扎西康炭质板岩的炭质物含量及炭质物电阻率

Table 3 Organic carbon contents and resistivity of carbonaceous slate in Zhaxikang mining area

样品号	炭质物含量(%)	炭质物电阻率($\Omega \cdot m$)
4006-3	0.78	6.10×10^{-5}
4006-11	0.77	1.03×10^{-4}
4006-13	0.72	6.80×10^{-4}
4006-19	0.58	1.85×10^{-4}
4006-23	0.75	2.00×10^{-4}
4006-24	0.72	1.86×10^{-4}
4006-30	1.15	1.49×10^{-4}
4006-32	1.04	1.96×10^{-4}
4006-37	0.95	7.70×10^{-5}
406-19	0.62	4.78×10^{-4}
406-31	0.62	2.90×10^{-4}
406-43	0.95	5.46×10^{-4}
406-46	0.68	3.02×10^{-4}
406-49	0.84	4.50×10^{-4}
406-51	0.78	1.20×10^{-4}
406-71	0.72	8.70×10^{-5}

炭质物之间的连通程度会对炭质板岩的电性特征产生重要影响。炭质板岩中 0.79% 含量的炭质物,并不能保证炭质物之间是完全连通的。炭质物有着特殊的拉曼特征峰,可以通过拉曼线扫描来研究微米尺度的炭质物连通性。在炭质板岩中选取 100 μm 长度的区域,以 2 μm 的光束 1 μm 的间隔,对炭质板岩进行线扫描。由图 5 可知,每个光斑都有炭质物拉曼特征峰,可以推断炭质物在微米尺度是连通的。同时,每个光斑的炭质物拉曼强度有所变化,D1 峰(约在 1345 cm^{-1} 处)的最小强度约 1.8 $\times 10^4$,最大约 12 $\times 10^4$ (图 5),而拉曼峰的强度跟区

域内特征物质的含量有关,说明在 100 μm 范围内炭质物的分布是不均一的。因此,需要更小尺度的方法来研究炭质物的连通特征。

随着含炭质岩石的变质程度加强,其中的炭质物向石墨化方向演化,同时形成特殊的炭质纹理结构,为高分辨率透射电镜研究提供了物质基础。图 6e 的选区电子衍射图显示炭质物的特征衍射,说明图 6b 中不连续的黑色点状物为炭质物。放大 400000 倍后,图 6d 隐约可见炭质纹理结构,也说明黑色点状物为炭质物。图 6a 的黑色块状物进行 400000 倍放大后,图 6f 可见明显的炭质纹理结构,说明其是炭质物。通过不同倍数的透射电镜研究,扎西康炭质板岩中的炭质物呈现以下几点特征:(1)炭质物的颗粒大小不均一,在 $n \sim n \times 100$ nm 之间;(2)炭质物分布不均匀(图 6b);(3)炭质物颗粒在纳米尺度是部分连通的(图 6c、d);(4)炭质物主要呈现从一维杂乱结构向三维石墨层结构过渡的二维结构(图 6f)。

因此,炭质板岩呈现低阻高极化电性特征的原因:岩石中的炭质物有着极好的导电性,在微米尺度是连通的,在纳米尺度是部分连通的;岩石中含有大量黏土矿物,且一般黏土矿物多以纳米结构存在,其易吸附地层水的性质,会改善炭质物之间的连通性。以上两方面耦合使得炭质板岩呈现低阻高极化特征。

3.3 扎西康铅锌矿脉分布于高阻低极化异常带的原因

由图 3a 可知,平面上高极化区域的钻孔不含矿,含矿钻孔位于低极化异常区。由图 3b、c 可知,深部矿体位于高视电阻率区域,且宽度 250 m 的高

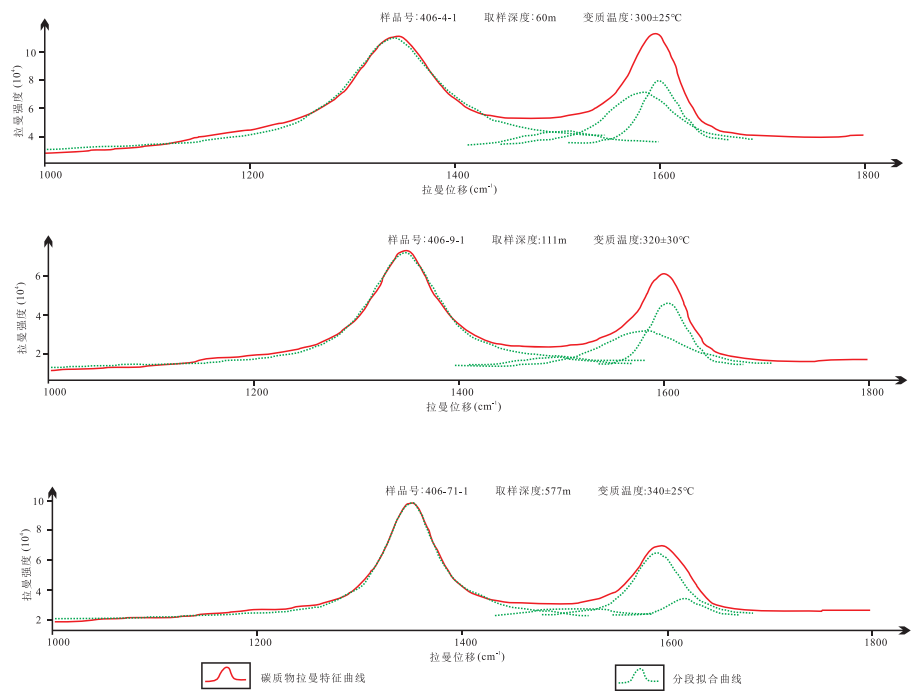


图4 扎西康炭质板岩中炭质物的拉曼特征峰及其变质温度

Fig. 4 Raman characteristic peak and metamorphic temperature of carbonaceous matter of carbonaceous slate in Zhaxikang mining area

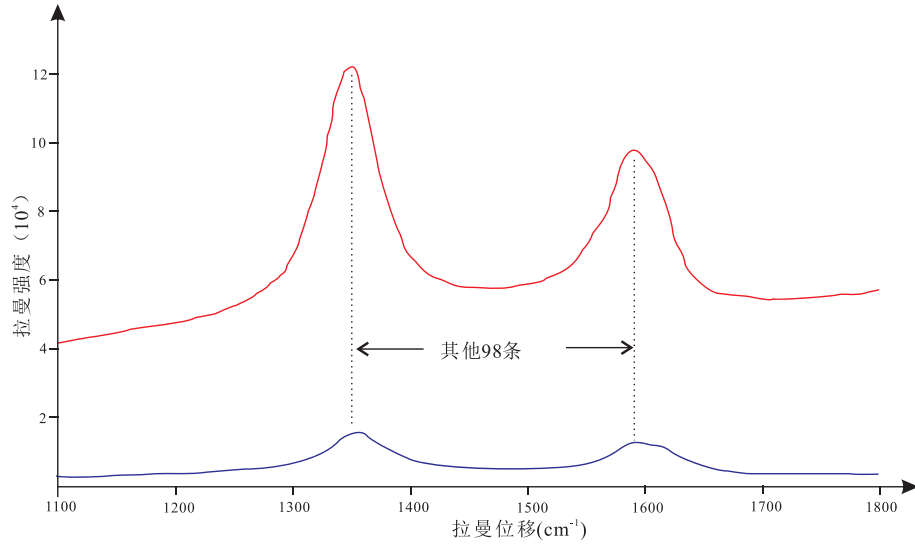


图5 炭质板岩的拉曼线扫描

Fig. 5 Results of Raman line scanning of carbonaceous slate in Zhaxikang mining area

视电阻率区域与低视极化率条带位置较吻合。综上所述,大功率激电中梯扫面和音频大地电磁测深,在扎西康炭质板岩中的找矿效果显著。那么250 m宽的高阻低极化率条带是否为矿致异常? 本文认为并非矿致异常:扎西康矿区铅锌矿的视电阻率、视极化率等呈现低阻高极化的电性特征,视极化率约为8%~20%(焦彦杰等,2015,2017),与炭质板岩电性相近,两者叠加不会出现1%~5%低

极化率条带。

从以下两方面来分析矿体赋存于高阻低极化条带的原因:构造热液活动对炭质物连通性的影响;构造热液活动对炭质物性质的影响。

3.3.1 构造热液活动对炭质物连通性的影响

扎西康的成矿过程是多期多阶段的,且在矿石的形成过程中伴随着大量脉石矿物的形成,如石英、方解石(图7)。

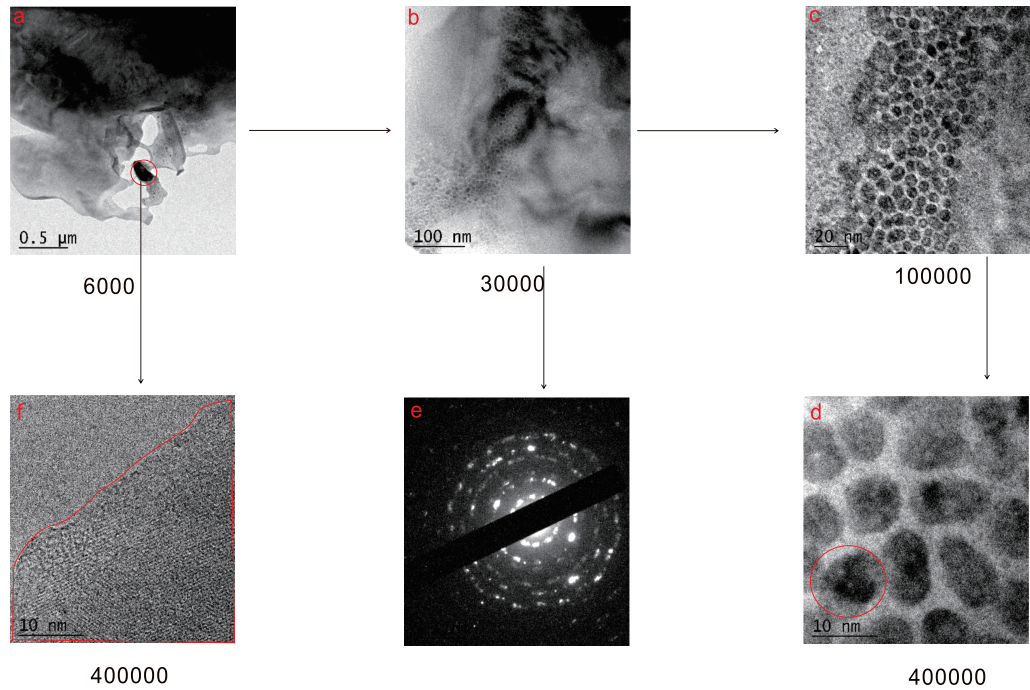


图6 高分辨率透射电镜观察不同尺度炭质物的连通性展示图

a. 放大 6000 倍样品基本形貌图; b. 放大 30000 倍样品形貌图; c. 放大 100000 倍样品形貌图; d. 放大 400000 倍样品形貌图; e. 图 b 的选区电子衍射图; f. 图 a 中红圈区域放大 400000 倍样品形貌图

Fig. 6 The connectivity of carbonaceous matter observed by HTEM at different scales

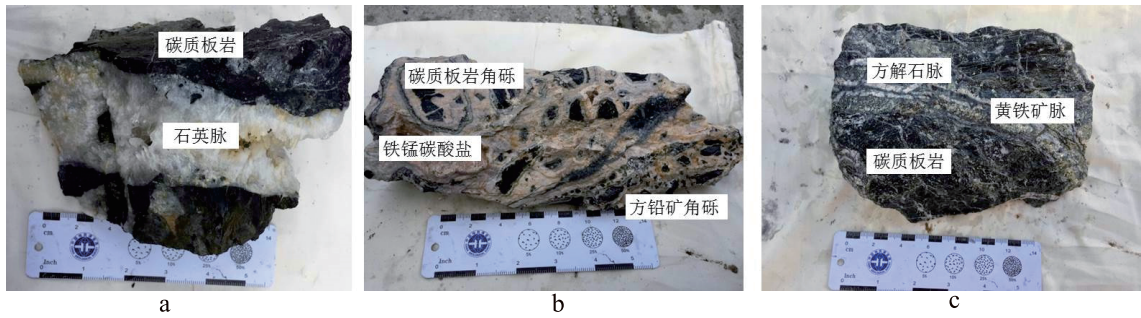


图7 断裂带中脉石、矿石及炭质板岩的空间关系照片

a. 脉石矿物切断了含炭质岩石; b. 脉石矿物包裹着闪锌矿、炭质板岩等的角砾; c. 脉石与矿石共同夹持于含炭质岩石中

Fig. 7 Photographs showing the spatial relations among gangue, ore and carbonaceous slate in fault zones

在岩石中炭质物处于连通的情况下,可以用并联和串联模型来分析岩石的电阻率 (Schulgasser, 1976, 1977), 等效电阻率计算公式为:

$$R_p = R_x \cdot R_y / (f_y \cdot R_x + f_x \cdot R_y),$$

$$R_s = f_x \cdot R_x + f_y \cdot R_y,$$

其中, R_p 为并联电路的等效电阻率; R_s 为串联电路的等效电阻率; R_x 、 R_y 分别为岩石中不同矿物的等效电阻率; f_x 、 f_y 为对应矿物的体积分数。

设炭质物(石墨)的电阻率为 $10^{-5} \Omega \cdot m$, 体积分数 1% ~ 5%; 矿石的电阻率为 $1 \Omega \cdot m$, 体积分数 1% ~ 5%; 石英、方解石等脉石矿物的电阻率为 10^3

$\Omega \cdot m$, 体积分数 5% ~ 10%; 造岩矿物的电阻率为 $10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot m$, 体积分数 80% ~ 95%。如图 8a 所示, 断裂形成前, 地层的等效电阻率模型, 约为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \Omega \cdot m$; 如图 8b 所示, 断裂形成后, 矿石、脉石等矿物填充断裂, 破坏了炭质物的连通性, 地层的等效电阻率模型, 约为 $10^2 \sim 10^3 \Omega \cdot m$ 。也就是说, 断裂带破坏了炭质物的连通性, 引起了明显的岩石电阻率变化。且根据扎西康矿床脉石矿物大量发育, 可能 10 倍于矿石矿物(唐菊兴等, 2012), 通过正演模拟, 发现大量的脉石矿物能够引起可探测的高电阻率异常(图 9)。

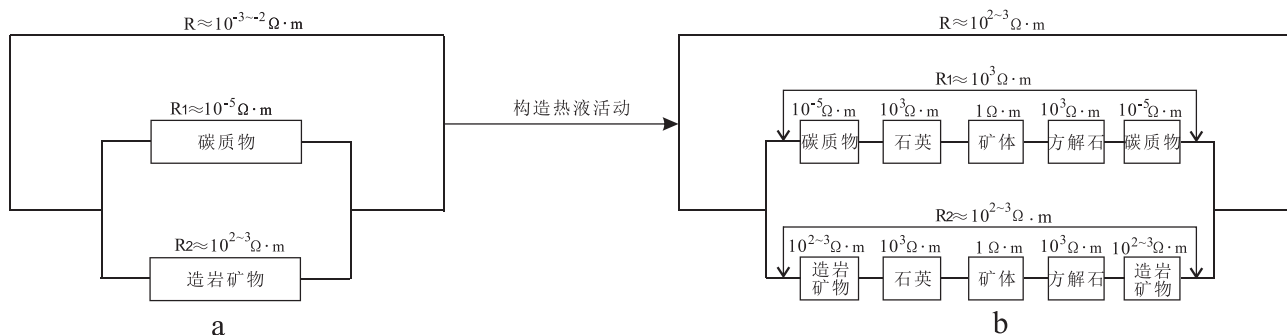


图8 构造热液活动对炭质物连通性影响的等效电路模型图

a. 构造热液活动前,炭质物的连通性未被破坏,炭质物与造岩矿物组成并联电路模型;b. 构造热液活动后,炭质物的连通性被脉石破坏,炭质物与脉石矿物组成串联电路模型

Fig. 8 An equivalent circuit model for the effect of hydrothermal activity on the connectivity of carbonaceous matter

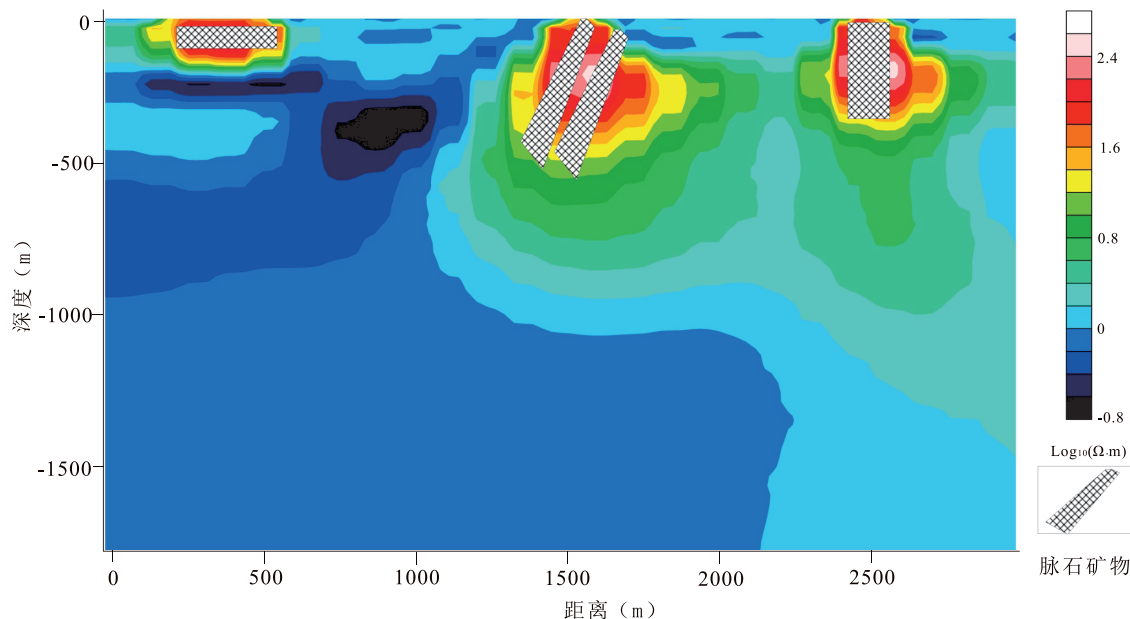


图9 脉石矿物电阻率异常的正演模拟

Fig. 9 Forward modeling of resistivity anomalies of gangue minerals

3.3.2 构造热液活动对炭质物性质的影响

沉积岩岩石成因的研究表明,含炭质岩石一般由原始的腐殖质型炭质地层遭受变质而成。含有机质的沉积岩在埋深增大过程中,其中有机质通过释放氢、氮和氧,日益成熟、富碳以及晶体有序度升高,最终成为晶质石墨(Durand and Monin, 1980),且该过程是随温压系数渐变化而连续进化的(Buseck et al., 1985; Beyssac et al., 2002)。

从分子层面看,石墨化是岩石中炭质物更多的碳原子层堆垛成了碳层堆,且部分碳层堆的取向趋于一致,即开始出现分子定向排列,造成了炭质物结构的有序度升高,这是炭质物导电的关键(黄伯钧, 1987)。这也是含炭质岩石存在电性干扰的根

本原因。

不同含炭质岩石发生区域和接触变质作用时,炭质物在结构有序度增高的方向按下列顺序发生连续的变化:沥青-碳沥青-次石墨-石墨。然而,赋存于含石墨或次石墨岩石中的热液型铀、金、多金属等矿床,在矿石中常出现低变质的硫沥青。在成矿流体蚀变下发生了“逆石墨化”(使炭质脱碳化、非晶质化),使炭质物按下列顺序发生连续的变化:石墨-次石墨-碳沥青-硫沥青(黄伯钧, 1987)。

石墨、次石墨具有高的电子导电性,电性特征的呈现形式为低阻($< 10^{-5} \Omega \cdot m$)高极化($> 40\%$)特征。但是硫沥青是无定形物质,并且所含有的

氢、氧、硫等混合物达 50%。因缺失滑动面,它对电流具有绝缘体的性质,电性特征的呈现形式为高电阻率($>10^5$)和低极化率($<2\%$)(Евстигнеев et al.,1991)。由此可见,炭质物性质的变化会引起较大的电性变化(图 10)。

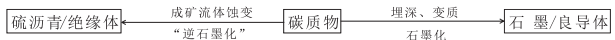


图 10 炭质物性质变化对岩石电性特征影响的示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the influence of carbonaceous matter property changes on the electrical characteristics of rocks

通过研究炭质物的结构和成分变化来探讨其性质变化。炭质物的结构随地质温度的升高向石

墨结构演化,可以用炭质物的地质温度计来描述其结构变化。炭质物的成分变化则用 ^{13}C 描述(V-PDB)。通过炭质物的碳同位素分析可知,扎西康炭质板岩中炭质物呈现有机碳同位素特征,变质温度 $300^{\circ}\text{C}\sim 340^{\circ}\text{C}$ 左右(表 5)。且围岩、铅锌矿、铁锰碳酸盐、石英四种样品的炭质物(除围岩外,其他的炭质物均提取自与铅锌矿、铁锰碳酸盐、石英接触的炭质板岩)碳同位素、变质温度和电阻率无明显变化(表 4)。可以推断,构造热液活动未对炭质物产生结构、成分和电性特征上的明显改造(表 4)。因此,高阻低极化异常带的形成,主要是构造热液活动形成的脉石矿物破坏了炭质地层的连通性造成的。

表 4 不同岩性炭质物碳同位素、变质温度、电阻率统计表

Table 4 Statistics of carbon isotopes, metamorphism temperature and resistivity of carbonaceous matter of different lithology

样品分类	变质温度($^{\circ}\text{C}$)	炭质物碳同位素(‰)	炭质物电阻率($\Omega\cdot\text{m}$)
炭质板岩中炭质物	320 ± 25	$-18.45\sim -22.82$	$5.4\times 10^{-5}\sim 6.6\times 10^{-4}$
铅锌矿脉周围炭质板岩中的炭质物	320 ± 30	$-19.05\sim -23.23$	$8.2\times 10^{-5}\sim 4.4\times 10^{-4}$
铁锰碳酸盐脉周围炭质板岩中的炭质物	320 ± 28	$-18.25\sim -23.63$	$2.4\times 10^{-5}\sim 7.3\times 10^{-4}$
石英脉炭质板岩中的炭质物	320 ± 23	$-19.15\sim -22.76$	$9.4\times 10^{-5}\sim 3.6\times 10^{-4}$

综上,炭质板岩的低阻高极化特征主要受两个因素影响:岩石中的炭质物有着极好的导电性,在微米尺度是连通的,在纳米尺度是部分连通的;岩石中的黏土矿物极易吸附地层水,吸附的地层水会改善炭质物之间的连通性。两个因素的耦合使得炭质板岩呈现低阻高极化特征。扎西康构造热液活动并未改变炭质物的结构和成分,其形成的大量脉石矿物,是炭质板岩中的高阻低极化异常的根本原因,可以作为间接找矿的标志。

3.4 对找矿的指导意义

热液脉型矿床因其矿体体积较小,增加了矿床勘查的难度。同时,金属硫化物与含炭质岩石相似的电性特征,使得以含炭质岩石为围岩的热液脉型矿床勘查更是难上加难。扎西康矿区前期勘探由于没有研究低阻高极化的异常成因,造成外围矿床勘查钻孔的失败(图 3a、b)。

前人对含炭质岩石的电性干扰做了较多研究,主要集中于矿体与含炭质岩石地球物理场特征的不同(罗延钟,1982;曾森甫和许建仁,1993,1994;周宁和李发清,1994),取得一定成效,但鉴于目前物探仪器的分辨率等问题,在实际找矿应用中很难区

分矿体与含炭质岩石。

本文以扎西康铅锌锑多金属矿为例,通过实验分析得出,岩石中炭质物含量为 0.79%,变质温度在 $300^{\circ}\text{C}\sim 340^{\circ}\text{C}$ 的炭质板岩,呈现与金属硫化物相似的低阻高极化电性特征。炭质板岩低阻高极化特征是岩石中的炭质物与黏土矿物、地层水耦合造成的,并不是矿致异常。构造热液活动形成的大量脉石矿物,可以在炭质板岩内引起高阻低极化异常,从而可作为找矿的间接标志。特提斯喜马拉雅成矿带沉积了大量的含炭质岩石,其中发育了众多热液脉型矿床(郑有业等,2007;周峰等,2011;韦慧晓等,2010;梁维等,2015)。青藏高原隆升的过程是岩石变质程度加剧的过程,也是炭质物石墨化程度加深的过程和导电性增强的过程;后碰撞伸展作用有利于深部流体上涌,是大量脉石矿物和矿石矿物形成的过程,也是含炭质岩石导电性减弱的过程。因此,本文提出的以构造热液活动带中脉石矿物引起的高阻低极化异常为目标的找矿思路,对特提斯喜马拉雅铅锌锑金成矿带内以含炭质岩石为围岩的热液脉型矿床勘探具有重要意义。此外,一些贵金属或稀有金属矿床难以引起可探测的地球

物理异常,可以通过对含炭质岩石中赋存贵金属或稀有金属的脉石矿物引起的电性异常进行勘查,达到间接找矿的目的。根据炭质板岩的电性特征和脉石矿物引起的电性异常,提出找矿方法组合:通过激电中梯测量可以在平面上定位构造热液活动带,其地下产状则通过音频大地电磁测深来进行分析。

4 结论

(1) 扎西康炭质板岩中炭质物平均含量约为 0.79%, 变质温度约在 $300 \pm 25^\circ\text{C} \sim 340 \pm 25^\circ\text{C}$, 显示极好的导电性。炭质板岩的低阻高极化主要受两种因素影响: 岩石中的炭质物有着极好的导电性, 在微米尺度是连通的, 在纳米尺度是部分连通的; 岩石中的黏土矿物极易吸附地层水, 吸附的地层水会改善炭质物之间的连通性。两种因素的耦合使得炭质板岩呈现低阻高极化特征。

(2) 扎西康构造热活动并未改变炭质物的结构和成分, 其形成的大量脉石矿物, 是形成炭质板岩中高阻低极化异常带的根本原因。

(3) 提供含炭质岩石中的新的找矿思路和技术方法组合: 金属硫化物与含炭质岩石有着相近的低阻高极化电性特征, 不具备直接针对金属硫化物目标体进行勘探的物性条件, 但成矿热液形成的大量脉体, 可以在含炭质岩石中引起明显的高阻低极化异常带, 从而作为间接的找矿标志。通过激电中梯测量可以在平面上定位构造热液活动带, 其地下产状则通过音频大地电磁测深来进行分析。

参考文献 (References):

- Beyssac O, Goffe B, Chopin N C, et al., 2002. Raman spectra of carbonaceous material in metasediments; a new geothermometer[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 858–871.
- Beyssac O, Goffe B, Petit J P, et al., 2003. On the characterization of disordered and heterogeneous carbonaceous matter by Raman spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 59:2267–2276.
- Burg J P, Guiraud M, Chen G M, et al., 1984. Himalayan metamorphism and deformations in the North Himalayan Belt (southern Tibet, China)[J]. *Earth Planet Science Letters*, 69: 391–400.
- Buseck P R, Huang B J, 1985. Conversion of carbonaceous material to graphite during metamorphism[J]. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 49: 2003–2016.
- Constable S C., Parker R L, Constable C G, 1987. Occama inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data [J]. *Geophysics*, 52 (3): 289–300.
- Disnar J R, Sureau J F, 1990. Organic matter in ore genesis: Progress and perspectives [J]. *Organic Geochemistry*, 16 (1–3): 577–599.
- Durand B, Monin J C, 1980. Elemental analysis of kerogen (C, H, O, N, S, Fe). In: Durand, B. (ed.) *Kerogen*. Technip, Paris: 114–161.
- Gorzhevskiy D I, 1987. On the role of organic matter in ore formation [J]. *International Geology Review*, 29(2): 207–217.
- Hodges K V, 2000. Tectonics of the Himalaya and southern Tibet from two perspectives[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 112: 324–350.
- Hodges K V, Parrish R R, Hoish T B, et al., 1992. Simultaneous Miocene extension and shortening in the Himalaya orogen [J]. *Science*, 258: 1466–1469.
- Léger A, Mathez E A, Duba A, et al., 1996. Carbonaceous material in metamorphosed carbonate rocks from the Waits River Formation, NE Vermont, and its effect on electrical conductivity [J]. *Journal of Geophysical Research, Part B: Solid Earth*, 101 (B10): 22203–22214.
- Oberlin A, Boulmier J L, Villey M, 1980. Electron microprobe study of kerogen microtexture. Selected criteria for determining the evolution path and evolution stage of kerogen. In: Durand, B. (ed.) *Kerogen*. Technip, Paris: 191–240.
- Pouba Z, Křibek B, 1986. Organic matter and the concentration of metals in Precambrian stratiform deposits of the Bohemian Massif [J]. *Precambrian research*, 33(1–3): 225–237.
- Rodi W L, Mackie R L, 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion [J]. *Geophysics*, 66 (1): 174–187.
- Sandford S A, Allamandola L J, 1990. The physical and infrared spectral properties of CO₂ in astrophysical ice analogs[J]. *The Astrophysical Journal*, 355: 357–372.
- Schulgasser K, 1976. Relationship between single-crystal and polycrystal electrical conductivity [J]. *Journal of Applied Physics*, 47 (5), 1880–1886.
- Schulgasser K, 1977. Bounds on the conductivity of statistically isotropic polycrystals [J]. *Journal of Physical Chemistry*, 10 (3), 407–417.
- Searle M P, Parrish R R, Hodges K V, 1997. Shisha Pangma leucogranite, South Tibetan Himalaya: Field relations, geochemistry, age, origin, and emplacement [J]. *Journal of Geology*, 105: 295–317.
- Smith J T, Booker J R, 1991. Rapid inversion of two and three dimensional magnetotelluric data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B3): 3905–3922.
- Sun X, Zheng Y, Pirajno F, et al., 2018. Geology, S-Pb isotopes, and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in Southern Tibet: implications for multiple mineralization events at

- Zhaxikang[J]. Miner Deposita, 53(3):435–458.
- Wang Y, Alsmeyer D C, McCreery R L, 1990. Raman spectroscopy of carbon materials: structural basis of observed spectra [J]. Chemistry of Materials, 2: 557–563.
- Wilhelm H, Lelaurain M, McRae E, et al., 1998. Raman spectroscopic studies on well-defined carbonaceous matter of strong two-dimensional character[J]. Journal of applied physics, 84: 6552–6558.
- Yin A, Harrison T M, 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogeny [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1):211–280.
- Yui Kouketsu, Tomoyuki Mizukami, Hiroshi Mori, et al., 2014. A new approach to develop the Raman carbonaceous material geothermometer for low-grade metamorphism using peak width[J]. Island Arc, 23:33–50.
- Zhou Q, Li W C, Qing C S, et al., 2017. Origin and tectonic implications of the Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit in northern Himalaya: evidence from structures, Re-Os-Pb-S isotopes, and fluid inclusions [J]. Miner Deposita, 53(4):1–16.
- O. A. Евстигнеев 等著, 仇勇海译, 1991. 关于炭质岩石和细脉侵染状硫化物型金矿床的激发极化现象[C]. 国外地质勘探技术, 4: 35–36.
- Л. И. Абаулина, 曾宪荣, 1988. 金矿床中碳质的热液改造[J]. 地质地球化学, (5):14–15.
- 曾森甫, 许建仁, 1993. 差异激电法探查地下水及区分矿种的初步研究[J]. 物探与化探, 17(5):362–367.
- 曾森甫, 许建仁, 1994. 电子导体的极化暂态特性与差异激电法[J]. 物探与化探, 18(5):371–377.
- 顾涛, 王迪民, 杨梅, 等, 2015. 高频红外碳硫仪测定土壤/沉积物中总碳质物研究[J]. 华南地质与矿产, 31:306–310.
- 郭镜, 焦彦杰, 梁生贤, 2019. 扎西康多金属矿含炭质岩石中赋矿断裂带的电性变化及找矿意义[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 46(4):471–481.
- 郭镜, 李文昌, 李光明, 等, 2019. 多尺度综合地球物理方法在扎西康铅锌锑金多金属矿找矿预测中的应用[J]. 地球科学, 44(6):2129–2142.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等, 2006. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6):629–651.
- 黄伯钧, 1987. 变质岩中碳质物结构的直接观察[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1:5–7.
- 焦彦杰, 梁生贤, 郭镜, 等, 2015. 西藏扎西康铅锌矿集区的物探方法组合试验. 物探与化探[J], 39(2):245–252.
- 焦彦杰, 梁生贤, 郭镜, 等, 2017. 西藏桑日则黑色岩系构造热液型铅锌矿定位预测研究[J]. 地球物理学进展, 32(2):634–639.
- 李建昌, 王永, 王丹, 等, 2011. 半导体电学特性四探针测试技术的研究现状[J]. 真空, 48(3):1–7.
- 李应棚, 李光明, 董随亮, 等, 2015. 西藏扎西康多金属矿床成矿过程中的流体性质演化初探[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(3):571–582.
- 郦新, 王笑笑, 2013. 高频红外碳硫仪测定土壤中的有机质[J]. 绿色科技, 5:303–304.
- 梁维, 2014. 特提斯喜马拉雅金锑铅锌成矿带成矿作用研究[D]. 北京:中国地质大学.
- 梁维, 杨竹森, 郑远川, 2015. 藏南扎西康铅锌多金属矿绢云母 Ar-Ar 年龄及其成矿意义[J]. 地质学报, 89(3):560–568.
- 梁维, 李光明, 张林奎, 等, 2020. 藏南错那洞铍稀有多金属成矿时代:来自热液白云母 Ar-Ar 年龄的约束[J]. 沉积与特提斯地质, 40(1):76–81.
- 罗延钟, 1982. 评价激电异常的新方法[J]. 国外地质勘探技术, (1):18–25.
- 罗镇宽, 1984. 金矿床中碳质的来源及其在成矿过程中的作用[J]. 黄金, (1):20–22.
- 孟祥金, 杨竹森, 戚学祥, 等, 2008. 藏南扎西康锑多金属矿硅-氧-氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应[J]. 岩石学报, 24(7):1649–1655.
- 莫如爵, 刘绍斌, 黄翠蓉, 等, 1989. 中国石墨矿床地质[M]. 中国建筑工业出版社.
- 唐菊兴, 刘敏院, 郑文宝, 等, 2012. 西藏自治区隆子县扎西康矿区铅锌多金属矿床资源储量核实报告[R]. 内部出版物.
- 王家映, 1992. 关于大地电磁的静校正问题[J]. 地质科技情报, 1:69–76.
- 韦慧晓, 孙晓明, 翟伟, 等, 2010. 藏南邦布大型金矿成矿流体 He-Ar-S 同位素组成及其成矿意义[J]. 岩石学报, 26(6):1685–1691.
- 谢复新, 1987. CO₂ 红外光谱分析及其键矩的计算[J]. 安徽大学学报, 2:44–47.
- 严良俊, 胡文宝, 陈清礼, 等, 2001. 长偏移距瞬变电磁测深法在碳酸盐岩覆盖区落实局部构造的应用效果[J]. 地震地质, 2:271–277.
- 张建芳, 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床成因研究[D]. 武汉:中国地质大学(武汉)硕士学位论文.
- 张进江, 杨雄英, 戚国伟, 等, 2011. 马拉山穹窿的活动时限及其在藏南拆离系-北喜马拉雅片麻岩穹窿形成机制的应用[J]. 岩石学报, 27(2):3535–3544.
- 张志, 李光明, 张林奎, 等, 2020. 藏南错那洞穹隆早渐新世含绿柱石花岗岩伟晶岩的成因机制及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 40(2):14–30.
- 郑有业, 多吉, 马国桃, 等, 2007. 藏南查拉普岩金矿床特征、发现及时代约束[J]. 地球科学, 32(2):185–193.
- 郑有业, 刘敏院, 孙祥, 等, 2012. 西藏扎西康锑多金属矿床类型、发现过程及意义[J]. 地球科学, 37(5):1003–1014.
- 郑有业, 孙祥, 田立明, 等, 2014. 北喜马拉雅东段金锑多金属成矿作用、矿床类型与成矿时代[J]. 大地构造与成矿学, 38(1):108–118.
- 周峰, 孙晓明, 翟伟, 等, 2011. 藏南折木朗造山型金矿成矿流体地球化学和成矿机制[J]. 岩石学报, 27(9):2775–2785.
- 周宁, 李发清, 2014. 双频激电在寻找有碳质干扰铅锌矿中的应用[J]. 矿产勘查, 5:796–801.
- 邹芳, 2014. 高频红外法测定碳酸盐型石墨矿中固定碳的研究[J]. 矿物岩石, 34(3):14–18.

Comprehensive electrical prospecting of hydrothermal vein type deposits in carbonaceous rocks in the Tethyan Himalayan Pb-Zn-Sb-Au metallogenic belt: A case study of the Zhaxikang Pb-Zn-Sb polymetallic deposit in southern Tibet

GUO Jing^{1,2}, JIAO Yanjie¹, LIANG Shengxian¹

(1. Chengdu center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Zhaxikang Pb-Zn-Sb polymetallic deposit, a typical hydrothermal vein type deposit in the Tethyan Himalayan Pb-Zn-Sb-Au metallogenic belt, occurs in the fault zone of carbonaceous slate. Because carbonaceous rocks and metal-bearing sulfides are usually with similar resistivity and polarization, and the ore bodies of hydrothermal vein type deposits are generally small, it is difficult to conduct electrical prospecting for sulfide ore bodies in carbonaceous rocks. The AMT and IP ladder measurements of known ore bodies in the Zhaxikang deposit show that carbonaceous slate in the area has low resistivity ($10^{-0.4 \sim 0} \Omega \cdot m$) and high polarizability (9% ~ 20%), while the ore bodies are characterized by high resistivity ($10^{2 \sim 3} \Omega \cdot m$) and low polarizability (1% ~ 5%). Based on following facts, an indirect geophysical prospecting method is proposed in this paper: (1) The average content of organic carbon in carbonaceous slate is 0.79% in Zhaxikang mining area; (2) the metamorphic temperature is about 300 ± 25 °C to 340 ± 25 °C; (3) the resistivity of organic carbon is $(6.1 \times 10^{-5} \sim 6.8 \times 10^{-4} \Omega \cdot m)$ and shows excellent conductivity; (4) a lot of clay minerals are contained in the carbonaceous slate, and the water absorption of clay minerals promotes the connectivity of organic carbon. The coupling of high conductivity and connectivity of organic carbon makes carbonaceous slate present low resistivity and high polarization; (5) vein-type ore bodies in the Zhaxikang deposit contain not only metal sulfides, but also a large number of gangue minerals, and gangue minerals are generally with high resistivity and low polarization, it is suggested that locating ore bodies in carbonaceous slate by identifying high resistivity and low polarization anomalies caused by gangue minerals is effective and useful. In addition, a suitable combination of prospecting methods is proposed, in which the planar position of the high resistance and low polarization zone can be located by IP measurement, and its deep occurrence can be detected by AMT measurement.

Key words: carbonaceous rock; hydrothermal vein type deposit; electric prospecting; Tethyan Himalayas; Zhaxikang Pb-Zn-Sb polymetallic deposit