

# 激发极化法和音频大地电磁测深在西藏斯弄多矿区找矿中的应用

杨宗耀<sup>1)</sup>, 张崇海<sup>2)</sup>, 张乐骏<sup>3)\*</sup>, 郎兴海<sup>2)</sup>, 赵晓彦<sup>1)</sup>, 严成明<sup>4)</sup>

1)西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川成都 611756;

2)成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

3)塔斯马尼亚大学卓越矿床研究中心, 澳大利亚霍巴特 7001;

4)四川省冶金地质勘查局六〇五大队, 四川眉山 620860

**摘要:** 斯弄多铅锌矿床位于西藏日喀则南木林盆地, 形成于印度-欧亚大陆碰撞背景下。该时期目前已发现如斯弄多、纳如松多、查孜、扎龙等大量铅锌矿床, 这些矿床具有相似的赋矿围岩和矿石类型, 但均存在地球物理研究工作开展极少, 围岩和矿石物性不明等问题。为了查明这些矿床的地球物理特征及地球物理找矿方法的适用性, 本文以斯弄多铅锌矿床为例, 采用激电中梯测量、激电测深和音频大地电磁测深, 结合地质资料综合分析, 以 2.5%为矿区视极化率异常下限, 并以此为依据在矿区圈定出主矿体北部受后期断层破坏后的位置, 异常强度高, 极大可能为矿体引起, 并通过实施验证钻孔发现了矿体。由于矿石和赋矿围岩物性差异较大, 电法在产于林子宗群火山岩中的脉型、隐爆角砾岩型铅锌矿找矿工作中适用性强, 可推广至整个冈底斯林子宗群火山岩带中应用。

**关键词:** 音频大地电磁测深; 激电中梯; 激电测深; 斯弄多; 林子宗群; 冈底斯

中图分类号: P612 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2019.051402

## The Application of Induced Polarization Method and Audio Magnetotelluric Sounding to the Exploration of the Sinongduo Deposit, Tibet

YANG Zong-yao<sup>1)</sup>, ZHANG Chong-hai<sup>2)</sup>, ZHANG Le-jun<sup>3)\*</sup>, LANG Xing-hai<sup>2)</sup>, ZHAO Xiao-yan<sup>1)</sup>, YAN Cheng-ming<sup>4)</sup>

1) Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756;

2) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059;

3) Centre of Excellence in Ore Deposit (CODES), University of Tasmania, Hobart, Australia 7001;

4) No. 605 Geological Party of Geological Exploration and Resources Development, Meishan, Sichuan 620860

**Abstract:** Located in the Nanmulin Basin of Xigaze, Tibet, the Sinongduo lead-zinc deposit was formed in the background of the India-Eurasia continental collision, where a large number of lead-zinc deposits such as Sinongduo, Narusongduo, Chazi and Zhazhalong have been discovered. These deposits have the similar host rocks and ore types, but the physical properties of the rocks and ores remain unclear because of the lack of physical work. In order to find out the geophysical characteristics of these deposits and the applicability of geophysical methods, the authors took the Sinongduo lead-zinc deposit as a study case to apply geophysical methods such as induced polarization intermediate gradient, induced polarization sounding and audio magnetotelluric sounding in exploration. Based on the comprehensive analysis of geological and geophysical data, the authors hold that the apparent chargeability of 2.5% should be the boundary between the ore and the host

本文由国家重点研发计划-深地专项(编号: 2018YFC0604105)和国家自然科学基金项目(编号: 41772075)联合资助。

收稿日期: 2019-01-11; 改回日期: 2019-05-07; 网络首发日期: 2019-05-15。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 杨宗耀, 男, 1991 年生。博士研究生。地质资源与地质工程专业。E-mail: yangzy91@163.com。

\*通讯作者: 张乐骏, 男, 1983 年生。研究员。主要从事矿产勘查等方面研究。E-mail: lejun.zhang@utas.edu.au。

rocks. The location of the northern part of the main orebody destroyed by later fault was inferred in the survey area where the anomalies are strong and have high probability caused by orebody, and this conclusion was proved to be reliable according to the mineralized drill holes. In general, electrical methods exhibit high applicability in exploring the vein type and cryptoexplosive type lead-zinc deposits formed in the Linzizong volcanic rocks due to the difference in physical properties between the ore and the host rocks and can be recommended to the whole Gangdise Linzizong Group volcanic rock belt in prospecting.

**Key words:** audio magnetotelluric sounding; IP intermediate gradient; IP sounding; Sinongduo; Linzizong Group; Gangdise

印度大陆和欧亚大陆的汇聚是全球最为重大的构造事件，伴随相关的大洋打开与闭合、陆-陆板块碰撞造山活动，使该区域岩浆、构造活动十分强烈，形成我国重要的冈底斯成矿带。该成矿带隶属于世界三大成矿域的特提斯成矿域，资源潜力巨大，但其位于高寒山区，永冻层发育、地形切割强烈、高差大。因此成矿系统的形成、保存、剥蚀等具有独特性，勘查评价技术方法集成、研发难度极大。据目前所发现的矿床成矿年龄来看，主要集中于古新世印度-欧亚大陆主碰撞期之后，如甲玛(唐菊兴等, 2010; Zheng et al., 2016)和驱龙(孟祥金等, 2003)等，少部分产于主碰撞期铅锌矿床，如纳如松多(纪现华等, 2014)和斯弄多等矿床。其次，在侏罗纪新特提斯洋内俯冲作用形成斑岩型铜金矿床(Lang et al., 2014; Tang et al., 2015; 杨宗耀等, 2017)。基于如上述矿床的成矿系统研究，唐菊兴等(2012)建立了从新特提斯洋早期俯冲到印度-欧亚大陆碰撞晚期的成矿模式，并指出了冈底斯成矿带下一步找矿突破的关键是在林子宗群火山岩中寻找斑岩-浅成低温热液型矿床(唐菊兴等, 2017)，但是科学问题必须要从实践中得到解答，因此我们希望实际的找矿工作中来证实这些科学观点。

斯弄多银多金属矿床是团队在冈底斯成矿带林子宗群火山岩中发现的首例低硫化浅成低温热液型矿床(唐菊兴等, 2016)，形成于陆缘弧背景之下的陆相火山岩中，这类矿床形成于地表浅部多小于1.5 km(Heald et al., 1987; White and Hedenquist, 1990; Hedenquist et al., 2000)，是斑岩成矿系统的一部分(Hedenquist and Lowenstern, 1994)，经剥蚀其保存深度可能更浅，利于勘查和开采。该矿床成因类型的厘定是对区域成矿理论的突破，前人已开展了大量研究。矿床具有低硫化浅成低温热液型矿床蚀变矿物组合(唐菊兴等, 2016)；伊利石、绢云母Ar-Ar年代学表明矿床形成于61~63 Ma，成矿流体以大气降水为主具有低温、低盐度的特征，S、Pb同位素显示成矿物质主要来源于林子宗群典中组火山岩(丁帅, 2017; Li et al., 2019)；矿区晶屑凝灰岩、流纹斑岩和英安岩形成于约63 Ma，具弧火山岩特征(丁帅等, 2017)；郭娜等(2019)通过短波红外技术

对矿床蚀变矿物进行研究，建立了斯弄多矿区的短波红外勘查模型，并指出铅锌矿体主要赋存于在绢云母-伊利石-蒙脱石带中。

目前斯弄多矿床已达中-大型规模，矿床因富银而具有极高经济价值，对该矿床的研究将推进在冈底斯东西长达1200 km的林子宗群陆相火山岩中的找矿工作。虽然林子宗群火山岩中具有巨大找矿潜力，但其分布面积巨大，如何能有效地缩小找矿靶区是一大难题(杨宗耀等, 2019)，传统的地球化学、地球物理方法是否适用于在林子宗群火山岩中找矿？本文依托“青藏高原重要矿产资源基地成矿系统深部探测技术与勘查增储示范”项目，在西藏冈底斯斯弄多矿床开展以激电中梯、激电测深和音频大地电磁测深等地球物理找矿方法，研究矿区的地球物理异常特征，为深部找矿技术累积经验，并实现矿区勘查增储。

## 1 成矿地质背景

前人研究表明，拉萨地体自三叠或中一晚白垩世从冈瓦纳大陆裂解并向北漂移，其北部在白垩世随着班公湖—怒江洋的消亡与欧亚大陆碰撞(Audley-Charles, 1983, 1984; Matte et al., 1996; Kapp et al., 2007)，南部最初由新特提斯洋板片俯冲于拉萨地体之下形成冈底斯陆缘火山弧，之后最早可能在古新世与印度大陆碰撞(Yin and Harrison, 2000)形成雅鲁藏布缝合带。斯弄多矿床位于西藏雅鲁藏布缝合带北部(图1a)拉萨地体冈底斯弧背断隆带，紧邻米拉山—洛巴堆断裂带(LMF)，由于其成矿年龄为古新世，因此，斯弄多矿床形成于印度大陆和拉萨地体碰撞早期或新特提斯洋板片俯冲于拉萨地体之下的陆缘弧背景。

矿区出露地层为古新世林子宗群典中组( $E_{1d}$ )火山岩，其年龄在62~65 Ma之间(丁帅等, 2017)；岩性主要为火山角砾岩、流纹斑岩、晶屑凝灰岩、凝灰岩和英安岩等。侵入岩分为花岗斑岩和黑云母花岗斑岩两种，其中黑云母花岗斑岩对矿体具有破坏作用，为成矿后期岩浆活动形成。构造则表现为以火山机构为中心的环形构造带加放射状断裂带，是矿床的主要控矿构造(图1b)。

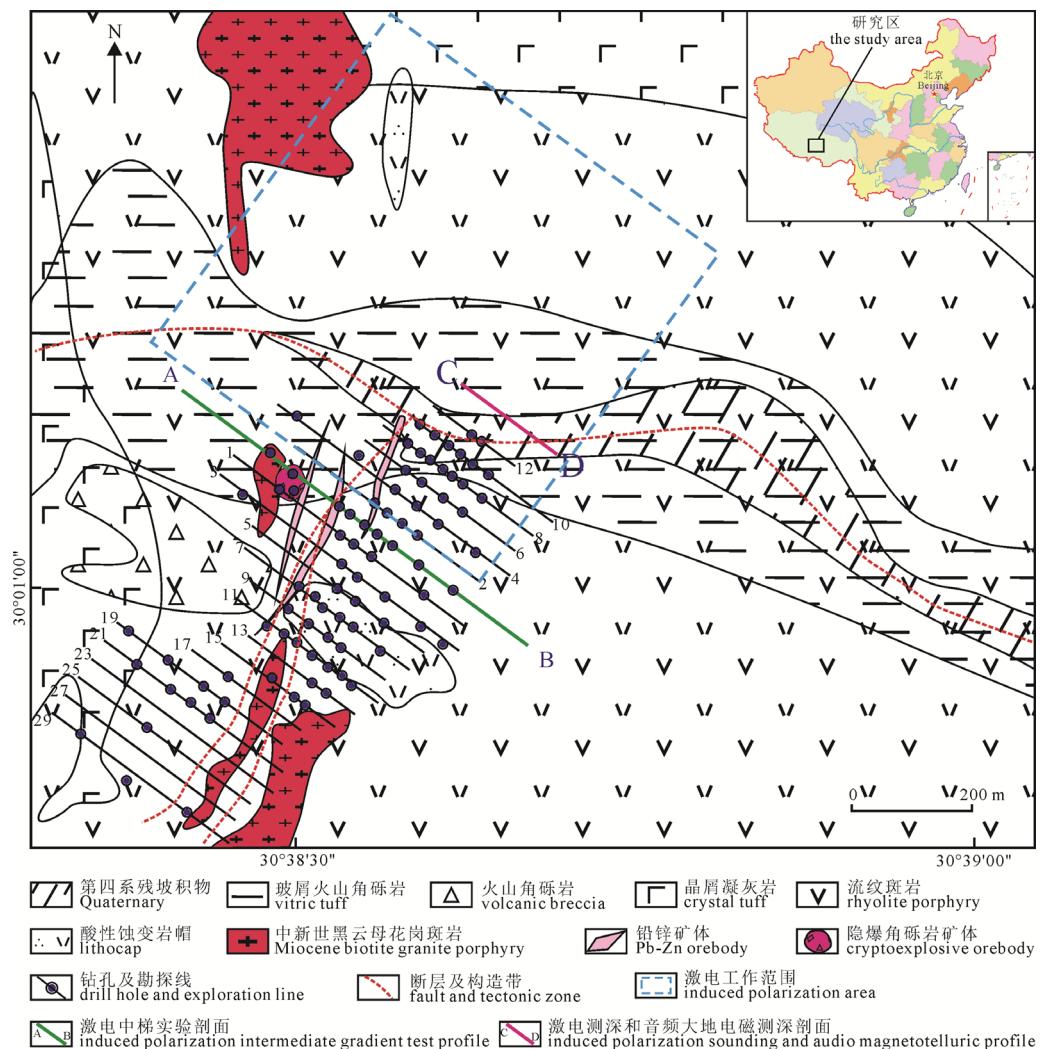


图 1 斯弄多矿区地质和工程布置图(据唐菊兴等, 2016 修改)  
Fig. 1 Geology and project layout of the Sinongduo deposit (modified after TANG et al., 2016)

矿床由三种矿体类型组成, 分别为热液脉型铅锌银矿体、隐爆角砾岩型铅锌银矿体和独立银矿体。热液脉型铅锌银矿体产于火山机构旁侧断裂构造中, 赋矿围岩为断裂构造上盘的晶屑凝灰岩和流纹斑岩, 主要矿石类型为块状、脉状、网脉状和少部分角砾状矿石; 隐爆角砾岩型铅锌银矿体产于断裂下盘, 矿体以方铅矿、闪锌矿和黄铁矿等金属硫化物和岩粉胶结围岩角砾形成角砾状矿石为主, 由于赋矿围岩为强伊利石化火山角砾岩, 因此推测该类型隐爆角砾岩型矿体与火山作用有关; 独立银矿体产于脉型铅锌矿体顶部, 赋矿围岩为晶屑凝灰岩, 其与铅锌矿体在空间上具有过渡关系, 从下至上分别为铅锌矿体、铅锌银矿体和独立银矿体, 矿石类型主要为块状, 呈明显的鲜红色。三种类型矿体在空间上、时间上及成因上具有密切联系。主要矿石矿物包括方铅矿、闪锌矿及辉银矿、硫砷铜银矿、深红银矿等自然银矿物(李壮等, 2017)。脉石矿物以石英、玉髓、碧玉、冰长石、绢云母、伊利石及铁锰碳酸盐等为主。

## 2 区域地球物理特征

区域主要分布林子宗群(E<sub>1-2</sub>)火山岩、上石炭统昂杰组(C<sub>2a</sub>)碳酸盐岩和部分新生代侵入岩, 总体表现为视极化率低背景场的特征。基本视极化率背景水平为 1.30%, 且背景场总体表现为变化平稳, 属于正常的背景场, 没有其他因素的干扰。视电阻率由于大面积分布的碳酸盐岩影响, 普遍呈现为高背景场, 因陡崖、残坡积物的分布具有极大的随机性, 从而形成视电阻率变化幅度较大的特性。相比于区域激电特征, 整个矿区视极化率背景水平为 1.76%, 视电阻率由于大面积分布的火山岩地层, 背景低于区域整体, 但仍然呈现出较为明显差异, 当有构造蚀变带或铅锌银多金属矿(化)体存在时, 其电阻率明显下降, 极化率明显升高, 呈低阻高极化特征, 电性指标  $\rho_s=10 \sim 500 \Omega \cdot m$ ,  $\eta_s=4\% \sim 20\%$ 。异常总体表现为低阻高极化, 个别异常表现为高阻高极化。这些特点在一定程度上可能都反映了区内以含矿破碎带为主体的含金属硫化物地质体。其次,

域上有零星出露碳质板岩，对激电异常应进行综合分析。

区域正常沉积的碎屑岩、碳酸盐岩磁性微弱，磁化率小于  $30 \times 10^{-5}$  SI。火山岩磁性变化较大，其中除晶屑凝灰岩磁性较强，磁化率大于  $2000 \times 10^{-5}$  SI 外，其余大部分酸性火山岩磁性微弱，磁化率小于  $60 \times 10^{-5}$  SI。侵入岩磁性从酸性至超基性逐渐增强，但各种岩石普遍具有强弱分明的两种磁性变化特征，强磁性基性侵入岩磁化率变化在  $1000 \times 10^{-5} \sim 3800 \times 10^{-5}$  SI 之间，弱磁性超基性岩磁化率小于  $1100 \times 10^{-5}$  SI。青藏高原地区处于一个完整封闭的重力负异常区，由边部往内，重力值降低。高原内部重力值变化比较平缓，而边部变化梯度较大，一般呈带状正负异常。

郎兴海等(2017)对斯弄多铅锌矿区各地质体地球物理参数进行了系统的研究，其流纹斑岩、火山角砾岩和晶屑凝灰岩等赋矿围岩的电阻率较高而极化率较低，电阻率一般大于  $1000 \Omega \cdot m$ ，其余岩类的电阻率较低，一般小于  $700 \Omega \cdot m$ ，非黄铁矿化围岩极化率均小于 2%。铅锌矿体具有中高极化率特征，主要集中在 2%~5%，其中在 2.5%附近最集中，铅锌矿脉为相对低阻。其次，矿区常见多层次(个)极化体迭加，使极化率异常解释较复杂，异常的低幅值也可能反映了极化体埋藏较大、金属硫化物含量较低和矿体(极化体)变化大、分布不均等几种情况。

### 3 实验方法及参数

斯弄多铅锌矿床矿体埋深均小于 500 m，因此激电工作和音频大地电磁测深在矿区适用性较强。郎兴海等(2017)在主矿体南部开展了激电中梯面积测量，目前已施工 9 个验证钻孔均发现新矿体，证实了物探工作的重要性。由于矿区 10 号勘探线有 5 个钻孔均见矿良好，但在 12 号勘探线矿体突然尖灭，两个钻孔仅见到少量铅锌矿细脉(图 1)，推测主

矿体可能受断层破坏。为了查明主矿体北部是否存在被断层位移的矿体，本次主要在斯弄多主矿体北部完成激电中梯面积测量  $0.64 \text{ km}^2$ ，采用 100 m 线距和 20 m 点距，共计 9 条测线，369 个测点。其次，完成激电测深剖面 1 条，测点 21 个；音频大地电磁测深剖面 1 条，测点 23 个。

#### 3.1 激发极化法

本次激电面积性和剖面测量选用中梯装置，激电测量仪器发射机选用加拿大凤凰地球物理公司研制生产的 V8-T3 型发射机，最大输出电压 1000 V，最大输出电流 9 A，最大功率 2.2 kVA，交流电源下，整流误差  $\pm 0.2\%$ ，输出电流稳定、可调，发射机的性能和各项技术指标完全符合规范要求。接收机选用重庆地质仪器厂研制生产的 DJS-8 型接收机，测量电压最大值为  $\pm 3 \text{ V}$ ，分辨率为 0.01 mV，精度为  $\pm 1\%$  个字，仪器延迟时间 100~1000 ms 可任意设置，接收机可自动进行自电补偿，增益调节，滤波及信号增强。

通过对 1200 m 和 1600 m 两种极距进行测试，结果几乎一致(图 2)，相差甚微，因测区大面积冰碛物覆盖，为保证接收信号可靠，本次选用 AB 极距为 1200 m。其次，以 8 s、16 s、32 s、64 s 四个供电周期进行供电周期测试，在正常场段各周期测定

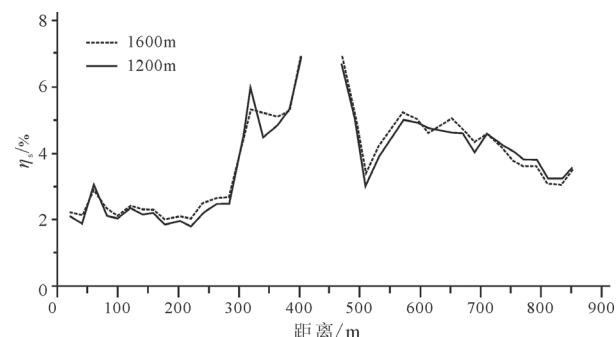


图 2 激电工作极距试验

Fig. 2 Electrode distance test of the induced polarization

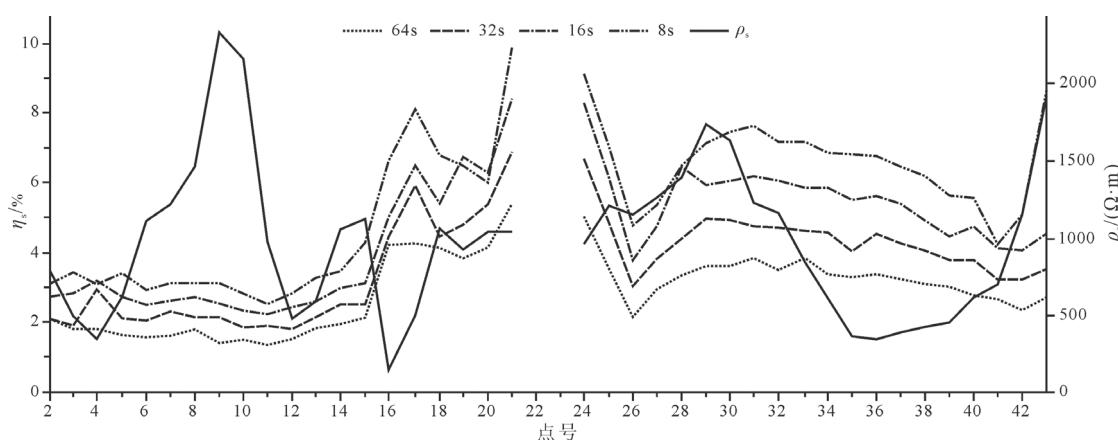


图 3 激电工作周期试验

Fig. 3 Electrode cycle test of the induced polarization

的极化率比较接近, 极化强度随周期的变长而变大。在异常场段, 极化强度随周期的变长而变大, 异常场均大于正常场的两倍, 能很好的反映异常(图 3)。基于突出异常, 压制干扰和效率并重的原则, 本次激电测量选择周期 16 s。

### 3.2 音频大地电磁测深

音频大地电磁测量仪器选用加拿大凤凰地球物理公司研制生产的 V8 综合电法观测系统, 包括 1 台主机: V8-6R, 2 台辅助道: RXU-3ER, AMTC-30 高频磁棒 2 根。具体参数为: 工业电频率: 50 Hz, LP Filter 设置为 2 档、Record of Band 2 per slot 设置为 4、Record of Band 3 per slot 设置为 2、Time slot 设置为 30。测量电极距选用 20 m, 测站按照正北坐标系布设, 在 500 m 范围内采用主机固定, 辅助站移动的方式进行测量, 每个测点观测时间大于 30 min。

## 4 讨论及找矿预测

### 4.1 异常下限

激电测量开工前, 在测区范围内选定地质揭露清楚、矿体、干扰体均有出露的 00 号勘探线做 A-B 试验剖面测量(位置见图 1), 通过激电中梯测量同时获得了视极化率  $\eta_s$  和视电阻率  $\rho_s$  两个参数的异常, 根据地物综合剖面确定本测区激电工作异常下限, 建立异常解释参考标准。

矿内主要地层为始新统林子宗群典中组( $E_2d$ )火山岩, 岩性主要有 7 种: 火山角砾岩、晶屑凝灰

岩、凝灰岩、流纹斑岩、英安岩。其次, 出露古新世纪花岗斑岩和中新世黑云母花岗斑岩(付燕刚等, 2017)。强泥化火山角砾岩、流纹斑岩、花岗斑岩、晶屑凝灰岩、隐爆角砾岩及火山碎屑岩均为低极化特征, 其极化率在 1.07~1.86 之间, 只有火山角砾岩的极化率相对较高为 2.23%。晶屑凝灰岩、火山角砾岩和流纹斑岩等围岩的极化率均小于 2.5%; 与成矿有关系的黄铁矿化极化率平均值为 4.06%, 寻找的目标矿种铅锌矿体极化率平均值为 3.37%~5.55%, 这 2 种矿(化)体的极化率均大于异常下限 2.5%, 为高极化特征。经实测, 黄铁矿化的电阻率值在 300~700  $\Omega\cdot m$  之间, 为低电阻。铅锌矿的电阻率值在 700~1300  $\Omega\cdot m$  之间, 为中低电阻。说明铅锌矿具有高极化中低电阻的电性特征。

由试验剖面成果图(图 4)可以看出, 试验剖面上 14~26 号点段, 钻孔 BZK0002、BQZK0021、BZK0001、BZK0003 均已见铅锌矿体, 矿体段异常显示为高极化(2.4%~6.8%), 中低电阻(1000~1300  $\Omega\cdot m$ ); 33~41 号点段, 为黄铁矿化段, 异常显示为低电阻率(300~600  $\Omega\cdot m$ ), 高极化率(3.0%~4.5%); 1~12 号点段, 为流纹斑岩、凝灰岩段, 异常显示为低极化(< 2.5%), 高电阻(900~2300  $\Omega\cdot m$ )。综合来看, 在背景值段曲线平缓稳定, 极化率值变化范围为 1.8%~2.4%, 到矿体段时极化率陡然变大, 由 2.4% 升高到 4.5%~6.8%。因此高极化应为黄铁矿或铅锌矿引起, 低电阻主要为黄铁矿引起, 中低电

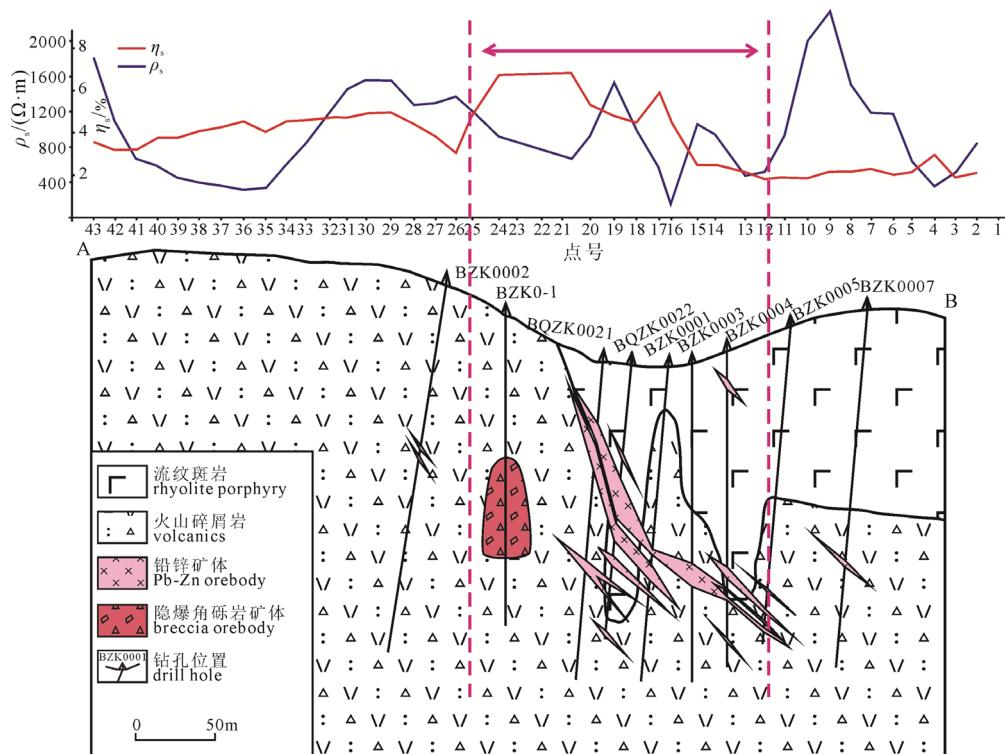


图 4 斯弄多矿区激电中梯剖面  
Fig. 4 Induced polarization intermediate gradient profile of the Sinongduo deposit

阻及高极化为铅锌矿的可能性更大, 极化率低于2.5%的地段为围岩的特征反映, 其一般对应为高电阻特征。由于电阻率易受到地形、构造、地下水等因素的影响, 变化较为复杂, 某些时候可能不满足上述规律, 因此电阻率参数在异常解释时不为主要解释参数, 仅在异常解释时参考。结合物性测量结果、地质情况及异常形态, 最后确定视极化率以2.5%为异常下限, 按照一定的梯度值圈定异常。

#### 4.2 异常解释及找矿预测

由激电中梯面积测量极化率等值线图(图5a)可以看出几乎整个测区视极化率均大于2.5%, 仅南部和北部角低于异常下限, 造成这种现象可能主要由

于火山角砾岩中含有浸染状黄铁矿(郎兴海等, 2017)。异常主要近东西走向, 向北有所延伸, 西侧异常不封闭, 异常强度高, 规模大。异常区视电阻率400~1400 Ω·m左右, 低阻带由南部角开始先向北延伸然后转向东部。视极化率高值区段, 电阻率值在800~1200 Ω·m之间, 为中低阻, 推测可能含黄铁矿较多。整个异常区域地形北西高为山脊、山坡, 出露岩石较破碎, 南东低为山脚、山沟, 大部分为第四系覆盖。推测该异常可能由多个南北向极化体相连组成一个近北东向椭圆展布的高极化中低阻异常, 该异常为含矿破碎带引起, 黄铁矿化较发育, 为矿致异常。异常等值线北稀南密, 异常区地形北

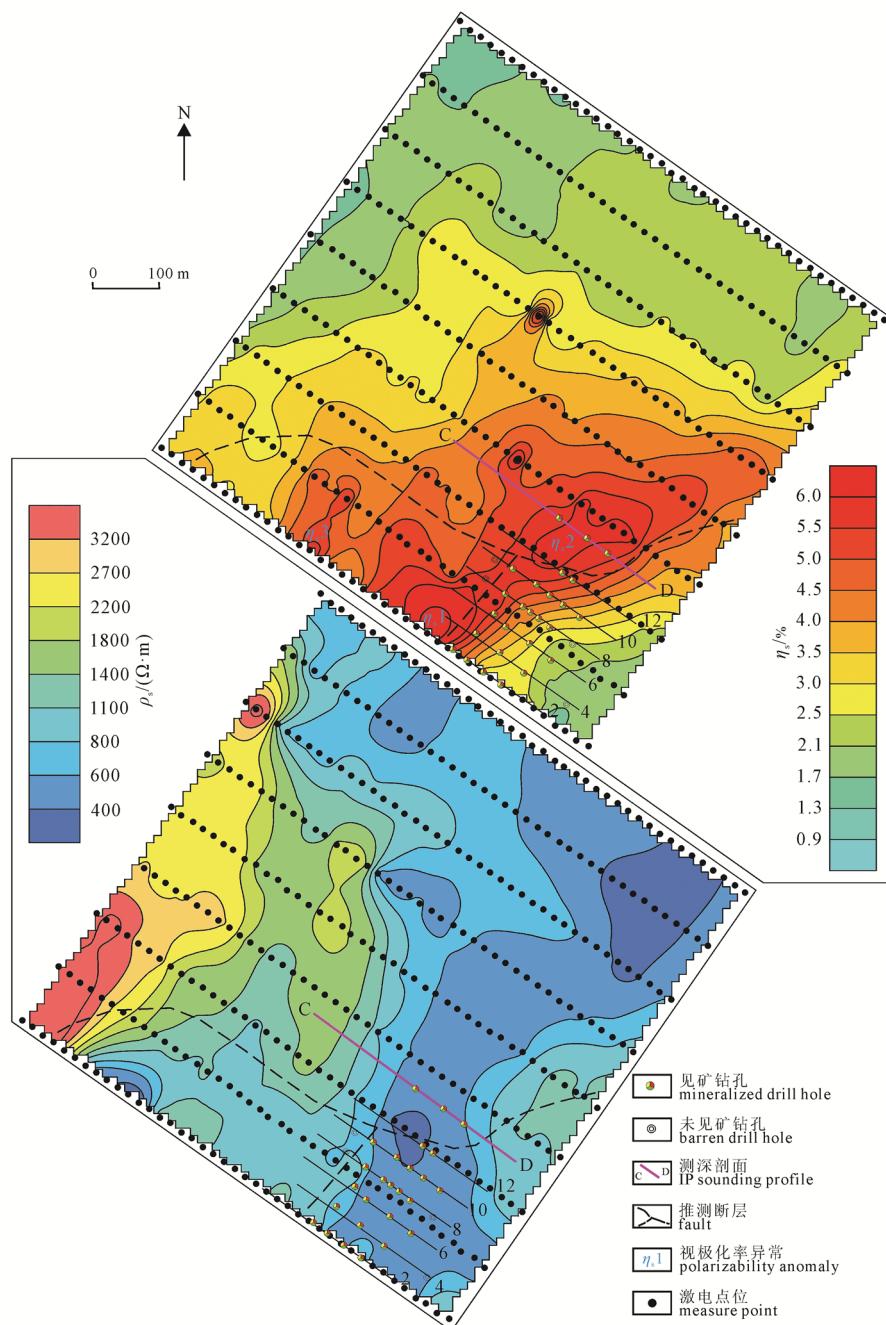


图5 激电中梯面积测量极化率等值线图(a)和电阻率等值线图(b)  
Fig. 5 IP isogram map of polarizability (a) and resistivity (b)

高南低, 推测为极化体在北部埋藏更深所致。

极化率异常极值中心可细分为 3 个子异常( $\eta_s1$ 、 $\eta_s2$ 、 $\eta_s3$ ), 异常中心视极化率极大值分别为 6.9%、6.6% 和 6.3%。 $\eta_s1$  和  $\eta_s3$  具有高极化中-低阻特征, 位于 2 号、4 号和 6 号勘探线北西端, 而 2 号、4 号和 6 号勘探线北西端钻孔仍然见矿(图 5), 并未控制矿体边界, 所以推测  $\eta_s1$  和  $\eta_s3$  异常为隐伏矿体所致。 $\eta_s2$  具有高极化低电阻特征, 在  $\eta_s2$  异常中心位布置激电测深剖面, 在 7 号测点至 18 号测点之间存在极强中-高极化率异常, 呈中-低电阻率特征(图 6), 异常高程在 4850 m 至 5050 m 之间, 与主矿体高程一致, 因此推测其为主矿体北部延伸部分。根据上述

结论, 在测深剖面上施工 BZK1401、BZK1402 和 BZK1403 钻孔以验证激电中梯测量成果(图 6)。结果 3 个钻孔均见铅锌矿, 但见矿位置并不是极化率中心, 多为极化率 5% 等值线附近, 具低阻特征。

根据矿区见矿钻孔和非见矿钻孔的分布特征, 可知目前控制的铅锌主矿体并不在视极化率极值中心, 而是分布于视极化率 2.5%~4.5% 带内(图 5a), 且极化率由低至高呈陡增的趋势, 表现为密集的极化率等值线, 同时极化率中心附近亦可产出少量铅锌矿脉。

由于怀疑主矿体北部遭到断层破坏, 因此在测深剖面上同时开展音频大地电磁测深(AMT)。大地

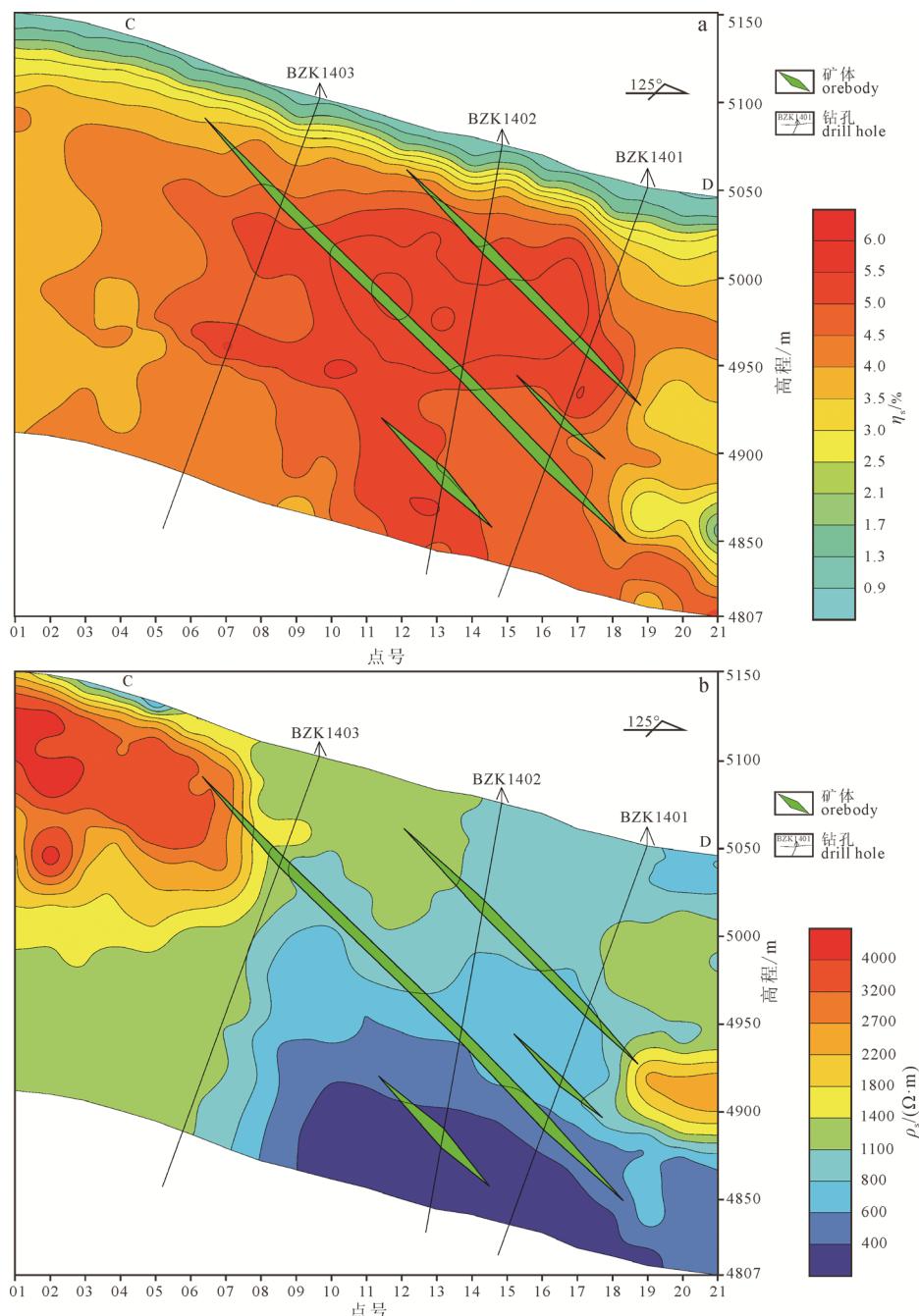


图 6 激电测深剖面极化率等值线图(a)和电阻率等值线图(b)

Fig. 6 Induced polarization sounding isogram profile of polarizability (a) and resistivity (b)

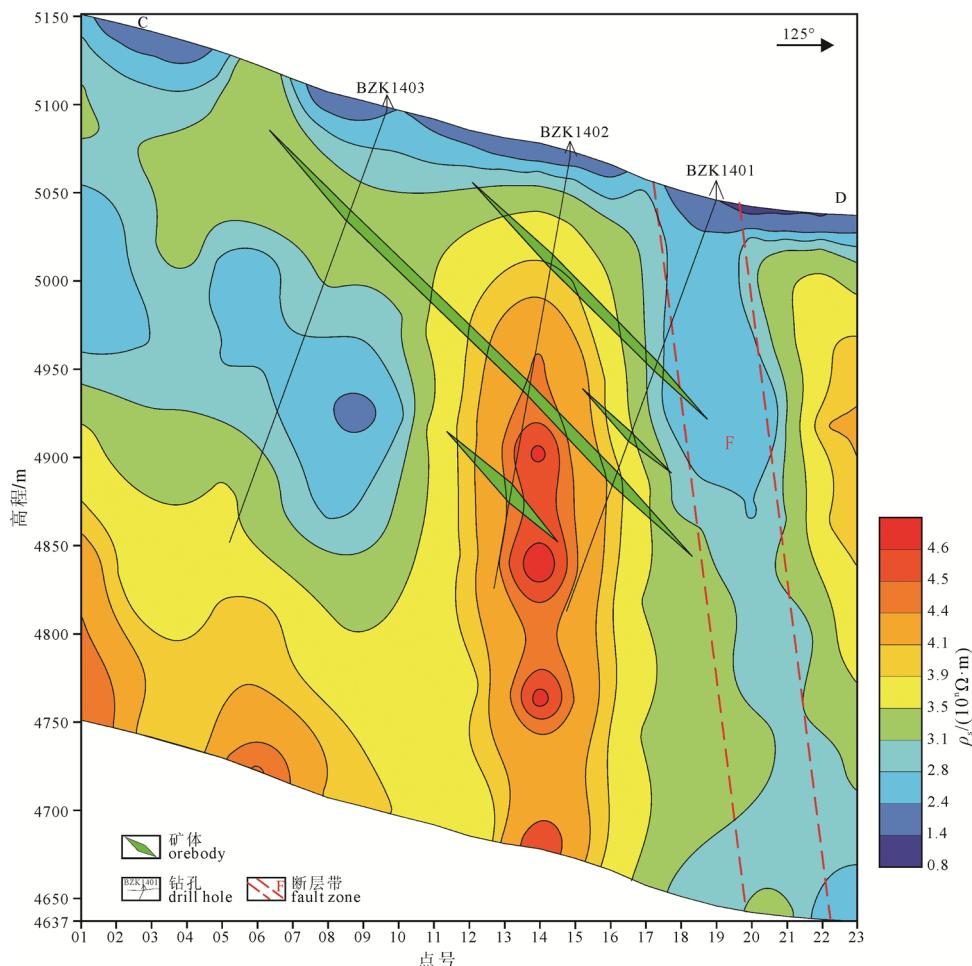


图 7 音频大地电磁测深视电阻率等值线图

Fig. 7 Apparent resistivity isogram profile of the audio magnetotelluric sounding

电磁场射向地下时,一部分被地质体吸收衰减,另一部分携带地下介质电性特征的电磁场信息被反射至地面,音频大地电磁测深正是基于此原理来反演地下地质体特征,其对地下二维地质体如背斜、向斜和断层等构造具有较强的反映,通过地面电磁场数据的采集和分析,可分析地下深达2 km 地质体的电阻率特征,具有横向分辨率高和不受低阻屏蔽效应影响等技术优势。

由音频大地电磁测深电阻率断面等值线(图7)可见,18号测点至20号测点之间存在一个明显的低阻带,两边为高阻,该异常极大可能由断层造成,且该处早期被推测为断层,因此证实了该断层的存在,且产状较陡,倾角约75°。通过比较激电测深(图6)和音频大地电磁测深效果,不难发现音频大地电磁测深的确对断层探测更为有效。

其次,图7中1号至10号点在4900 m至5050 m标高形成一个明显的低阻区,由2个子低阻体组成,倾角近60°,这与主矿体的产状及其相似,且在激电测深剖面上表现为中-低极化率特征,所以早期推测该处为多个隐伏矿体叠加所致,造成两种方法电阻率差异的原因可能为方法本身原理及测量过程

中的外部因素影响。但通过后期验证钻孔BZK1403可知其并不是矿体,经分析认为,这个异常带内极化率虽呈3%~4%,但整体极化率变化微弱,而斯弄多矿体以脉型为主,并不会形成大面积稳定的极化率异常带,所以这个异常更可能是岩石中浸染状黄铁矿含量较高引起。因此,相比于强调中高极化率集中的区域才是寻找具有工业价值的块状硫化物铅锌矿石的靶区(郎兴海等,2017),本文强调是陡增的极化率异常带才是铅锌矿体赋存的部位。

## 5 结论

通过激电中梯和激电测深工作,推测矿区2号线、4号线和6号线北西可能存在隐伏矿体。其次,基于音频大地电磁测深在矿区解译出一条陡倾断层,表现为低阻带夹持于高阻带之间,其倾角约75°,该断层为成矿后期断层,对斯弄多主矿体向北延伸起破坏作用。斯弄多铅锌矿床矿体埋藏浅,矿石和赋矿围岩具有截然不同的电性差异,激发极化法在矿区找矿工作中应用性较强。视极化率异常下限2.5%可有效的区分围岩和矿体,铅锌矿具有中-高极化和中低电阻的电性特征。激电中梯测量中具有

中-高极化率,且极化率呈陡增的区域大概率是铅锌矿的赋存部位。

虽然地球物理找矿方法能直接反应地下地质体情况,在国内外被广泛应用于研究找矿及油气、地壳结构、地质构造和工程地质等领域,其多解性一直以来也被地质工作者诟病,但这并不能阻止地球物理技术在地质领域的前进。目前世界上金属矿产的开采深度一般在1000 m左右,而我国的开采深度才500 m左右(曹令敏,2011),找矿工作走向深部是必然趋势,因此,加强地球物理技术在找矿工作中的应用,才能适应越来越严峻的资源勘查形势。同时,地球物理勘查方法是最方便的深部探测技术,但需要大量经验来改进,大地之下变化复杂,对地球物理数据解译不能简单的唯数据论,但同时又不能没有大量数据的支持,而大部分矿床的地球物理数据并没有在权威期刊发表,必然阻碍地球物理找矿方法的发展。因此,必须加强对地球物理方法在找矿工作中的研究。

**致谢:** 数据处理得到了四川省冶金地质勘查局六〇五大队黄雪林等人的帮助,在此表示衷心的感谢。

### Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China, Deep Resources Exploration and Mining Project (No. 2018YFC0604105), and National Natural Science Foundation of China (No. 41772075).

### 参考文献:

- 曹令敏. 2011. 地球物理方法在金属矿深部找矿中的应用及展望[J]. 地球物理学进展, 26(2): 701-708.
- 丁帅, 陈毓川, 唐菊兴, 谢富伟, 胡古月, 杨宗耀, 施硕, 李于海, 杨洪钰. 2017. 林子宗群火山岩与成矿关系: 以斯弄多浅成低温热液型矿床为例[J]. 矿床地质, 36(5): 1074-1092.
- 丁帅. 2017. 西藏冈底斯成矿带斯弄多浅成低温热液型银铅锌矿床成岩与成矿作用研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 付燕刚, 胡古月, 高一鸣, 杨宗耀, 林彬. 2017. 拉萨地块南木林盆地北缘中新世高锶低钇岩浆作用: 锆石U-Pb年龄、Hf同位素和地球化学特征[J]. 地质论评, 63(3): 643-658.
- 郭娜, 郭文铂, 刘栎, 黄一人, 郑龙, 郭亚楠. 2019. 冈底斯成矿带陆相火山岩区浅成低温热液矿床蚀变分带模型——以西藏斯弄多矿床为例[J]. 岩石学报, 35(3): 833-848.
- 纪现华, 孟祥金, 杨竹森, 张乾, 田世洪, 李振清, 刘英超, 于玉帅. 2014. 西藏纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿床绢云母Ar-Ar定年及其地质意义[J]. 地质与勘探, 50(2): 281-290.
- 李壮, 郎兴海, 丁帅, 李海峰, 杨宗耀, 施硕, 王立强, 李于海. 2017. 西藏斯弄多浅成低温热液型银铅锌矿床银的赋存状态研究[J]. 地球学报, 38(5): 687-701.
- 郎兴海, 唐菊兴, 杨宗耀, 丁帅, 胡古月, 李玉海, 谢富伟, 严成名. 2017. 西藏自治区谢通门县斯弄多铅锌矿区地球物理特征及找矿方向[J]. 地质与勘探, 53(3): 508-518.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 黄卫, 曲晓明, 屈文俊. 2003. 西藏冈底斯成矿带驱龙铜矿Re-Os年龄及成矿学意义[J]. 地质论评, 49(6): 660-666.
- 杨宗耀, 郎兴海, 唐菊兴, 张忠, 张金树, 高一鸣, 黄勇, 谢富伟, 付燕刚, 王勇. 2017. 西藏雄村铜金矿区侏罗系砂岩地球化学特征: 对构造背景的约束[J]. 地质学报, 91(9): 1985-2003.
- 杨宗耀, 唐菊兴, 张乐骏, 赵晓彦, 郎兴海, 张崇海. 2019. 西藏斯弄多地区岩帽地质地球化学特征: 林子宗群火山岩中成矿的指示[J]. 地球科学, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20190322.0856.006.html>.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型[J]. 地球学报, 31(4): 495-506.
- 唐菊兴, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 唐菊兴, 丁帅, 孟展, 胡古月, 高一鸣, 谢富伟, 李壮, 袁梅, 杨宗耀, 陈国荣, 李于海, 杨洪钰, 付燕刚. 2016. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床——以斯弄多银多金属矿为例[J]. 地球学报, 37(4): 461-470.
- 唐菊兴, 王勤, 杨欢欢, 高昕, 张泽斌, 邹兵. 2017. 西藏斑岩-矽卡岩-浅成低温热液铜多金属矿成矿作用、勘查方向与资源潜力[J]. 地球学报, 38(5): 571-613.

### References:

- AUDLEY-CHARLES M G. 1983. Reconstruction of eastern Gondwanaland[J]. Nature, 306(5938): 48-50.
- AUDLEY-CHARLES M G. 1984. Cold Gondwana, warm Tethys and the Tibetan Lhasa block[J]. Nature, 310(5973): 165-166.
- CAO Ling-min. 2011. The application and expectation of the geophysical methods to deep meta mine exploration[J]. Progress in Geophysics, 26(2): 701-708(in Chinese with English abstract).
- DING Shuai, CHEN Yu-chuan, TANG Ju-xing, XIE Fu-wei, HU Gu-yue, YANG Zong-yao, SHI Shuo, LI Yu-hai, YANG Hong-yu. 2017. Relationship between Linzizong volcanic rocks and mineralization: A case study of Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit[J]. Mineral Deposits, 36(5): 1074-1092(in Chinese with English abstract).
- DING Shuai. 2017. The diagenesis and metallogenesis in Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- FU Yan-gang, HU Gu-yue, GAO Yi-ming, YANG Zong-yao, LIN Bin. 2017. Miocene adakitic magmatism located at the northern part of Nammeling Basin in Lhasa Block: Zircon U-Pb age, Hf isotope and Geochemical characteristic[J]. Geological Review, 63(3): 643-658(in Chinese with English abstract).
- GUO Na, GUO Wen-bo, LIU Dong, HUANG Yi-ru, ZHENG Long, GUO Ya-nan. 2019. Alteration zoning model associated with Tibetan Sinongduo epithermal deposit, the continental volcanic areas of Gangdise metallogenic belt[J]. Acta Petrologica

- Sinica, 35(3): 833-848(in Chinese with English abstract).
- HEALD P, FOLEY N K, HAYBA D O. 1987. Comparative anatomy of volcanic hosted epithermal deposits-acid sulphate and adularia-sericite types[J]. Economic Geology, 80: 1-26.
- HEDENQUIST J W, ARRIBAS R A, GONZALEZ U E. 2000. Exploration for epithermal gold deposit[J]. Economic Geology, 13: 245-277.
- HEDENQUIST J W, LOWENSTERN J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. Nature, 370: 519-527.
- JI Xian-hua, MENG Xiang-jin, YANG Zhu-sen, ZHANG Qian, TIAN Shi-hong, LI Zhen-qing, LIU Ying-chao, YU Yu-shuai. 2014. The Ar-Ar geochronology of sericite from the crypto-explosive breccia type Pb-Zn deposit in Narusongduo, Tibet and its geological significance[J]. Geology and Exploration, 50(2): 281-290(in Chinese with English abstract).
- KAPP P, DECELLES P G, GEHRELIS G E, HEIZIER M, DING Lin. 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet[J]. Geological Society of America Bulletin, 119(7): 917-932.
- LANG Xing-hai, TANG Ju-xing, LI Zhi-jun, HUANG Yong, DING Feng, YANG Huan-huan, XIE Fu-wei, ZHANG Li, WANG Qin, ZHOU Yun. 2014. U-Pb and Re-Os geochronological evidence for the Jurassic porphyry metallogenic event of the Xiongcuon district in the Gangdese porphyry copper belt, southern Tibet, PRC[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 608-622.
- LANG Xing-hai, TANG Ju-xing, YANG Zong-yao, DING Shuai, HU Gu-yue, LI Yu-hai, XIE Fu-wei, YAN Cheng-ming. 2017. Geophysical characteristics and prospecting direction of the Sinongduo Pb-Zn deposit in Xietongmen county, Tibet[J]. Geology and Exploration, 53(3): 508-518(in Chinese with English abstract).
- LI Hai-feng, TANG Ju-xing, HU Gu-yue, DING Shuai, LI Zhuang, XIE Fu-wei, TENG Lei, CUI Shun-yao. 2019. Fluid inclusions, isotopic characteristics and geochronology of the Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Tibet, China[J]. Ore Geology Reviews, 107: 692-706.
- LI Zhuang, LANG Xing-hai, DING Shuai, LI Hai-feng, YANG Zong-yao, SHI Shuo, WANG Li-qiang, LI Yu-hai. 2017. A study of the modes of occurrence of silver in the Sinongduo epithermal Ag-Pb-Zn deposit, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(5): 687-701(in Chinese with English abstract).
- MATTE P, TAPPONNIER P, ARNAUD N, BOURJOT L, AVOUAC J P, VIDAL P, QING Liu, PAN Yu-sheng, WANG Yi. 1996. Tectonics of western Tibet, between the Tarim and the Indus[J]. Earth and Planetary Science Letters, 142: 311-330.
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, GAO Yong-feng, HUANG Wei, QU Xiao-ming, QU Wen-jun. 2003. Re-Os dating for molybdenite from Qulong porphyry copper deposit in Gangdese Metallogenic Belt, Xizang and its metallogenic significance[J]. Geological Review, 49(6): 660-666(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, DING Shuai, MENG Zhan, HU Gu-yue, GAO Yi-ming, XIE Fu-wei, LI Zhuang, YUAN Mei, YANG Zong-yao, CHEN Guo-rong, LI Yu-hai, YANG Hong-yu, FU Yan-gang. 2016. The first discovery of the low sulfidation epithermal deposit in Linzizong Volcanics, Tibet: A case study of the Sinongduo Ag polymetallic deposit[J]. Acta Geoscientica Sinica, 37(4): 461-470(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, DORJI, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Mineralogical series of ore deposits in the east part of the Gangdese Metallogenic Belt[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, LANG Xing-hai, XIE Fu-wei, GAO Yi-ming, LI Zhi-jun, HUANG Yong, DING Feng, YANG Huan-huan, ZHANG Li, WANG Qin, ZHOU Yun. 2015. Geological characteristics and genesis of the Jurassic No. I porphyry Cu-Au deposit in the Xiongcuon district, Gangdese porphyry copper belt, Tibet[J]. Ore Geology Reviews, 70: 438-456.
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Qin, YANG Huan-huan, GAO Xin, ZHANG Ze-bin, ZOU Bing. 2017. Mineralization, exploration and resource potential of porphyry-skarn-epithermal copper polymetallic deposits in Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 38(5): 571-613(in Chinese with English abstract).
- WHITE N C, HEDENQUIST J W. 1990. Epithermal environment and styles of mineralization: variations and their causes and guidelines for exploration[J]. Journal of Geochemical Exploration, 36(3): 445-474.
- YANG Zong-yao, LANG Xing-hai, TANG Ju-xing, ZHANG Zhong, ZHANG Jin-shu, GAO Yi-ming, HUANG Yong, XIE Fu-wei, FU Yan-gang, WANG Yong. 2017. Geochemical characteristics of the Jurassic sandstones in Xiongcuon copper-gold deposit, Tibet: Constraints on tectonic setting[J]. Acta Geologica Sinica, 91(9): 1985-2003(in Chinese with English abstract).
- YANG Zong-yao, TANG Ju-xing, ZHANG Le-jun, ZHAO Xiao-yan, LANG Xing-hai, ZHANG Chong-hai. 2019. Geological and geochemical characteristics of lithocaps in Sinongduo area, Tibet: Implications for the mineralization in Linzizong Group volcanic rocks[J]. Earth Science, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20190322.0856.006.html>(in Chinese with English abstract).
- YIN A, HARRISON T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28: 211-280.
- ZHENG Wen-bao, TANG Ju-xing, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, LENG Qiu-feng, DING Shuai, LIN Bin. 2016. Geology of the Jiama porphyry copper-polymetallic system, Lhasa Region, China[J]. Ore Geology Reviews, 74:151-169.