瞬变电磁法在高海拔金矿构造延伸预测中的应用研究

李新本[1,2],俞国平[1,2]

1.青海省第六地质勘查院,青海 格尔木 816000;
2.都兰金辉矿业有限公司,青海 格尔木 816000

摘 要:五龙沟金矿田位于东昆仑造山带中段,属于中低温岩浆热液型—构造蚀变岩型金矿床,区内金矿体严格受破碎构造蚀变带控制。为揭示该矿床深部控矿构造特征,评价深部找矿潜力,基于以往岩(矿)石物性测试成果开展研究。结果表明,矿体顶底板围岩与赋矿构造蚀变带岩石之间存在明显的电阻率差异。鉴于这一物性差异,在矿区中深部采用适宜物探方法,能够有效查明含金破碎蚀变带的空间延伸特征,进而为深部钻探工程布设提供科学依据。采用瞬变电磁法在深水潭金矿区黄龙沟矿段中深部进行探索试验,针对黄龙沟矿段井下布设4条剖面,探测结果显示构造蚀变带呈低阻反应异常明显,结合地质资料,初步厘清区内断裂、含金成矿带与低阻异常的空间展布对应关系,针对构造带产状变化剧烈的部位,部署钻孔进行验证,并在瞬变电磁法圈定的低阻异常区内成功发现金矿体,证实了该方法在深部控矿构造探测中的有效性和可行性。该成果不仅为该区中深部矿产勘查工作提供了重要的基础地质资料和实际指导,也为类似地区构造蚀变带的勘查工作提供了新思路。

关键词:构造蚀变岩型金矿;控矿构造;隐伏矿体;瞬变电磁法;低阻异常;五龙沟金矿田

中图分类号:P618.51 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-2518(2026)04-0870-11 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.326

引用格式:李新本,俞国平.瞬变电磁法在高海拔金矿构造延伸预测中的应用研究[J].黄金科学技术,2026,34(4):870-880.LI Xinben,YU Guoping.Application of Transient Electromagnetic Method in Structural Extension Prediction of High-Altitude Gold Deposits[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):870-880.

随着我国对黄金资源需求的持续增长,浅部易识别金矿资源日益枯竭,深部找矿已成为缓解资源供需矛盾和保障国家资源安全的重要战略方向(宋明春,2017;毛先成等,2020;滕吉文等,2026),也是当前金属矿产勘查领域亟待解决的研究课题。全国矿产资源潜力评价工作报告显示,我国矿产资源2 000 m以浅的预测资源量普遍为已探明资源量的2倍以上,深部找矿潜力巨大(叶天竺等,2015)。五龙沟金矿田地处东昆仑造山带中段,作为该成矿带内重要的金矿集中区之一,其矿床成因类型主要为中低温岩浆热液型和构造蚀变岩型,区内已发现的各类金矿体均严格受控于破碎构造蚀变带(陈伯林,2019;赵伟策等,2023)。近年来,该矿区浅部资源勘探力度不断提高,找矿工作逐步向深度迈进,初步地质调查工作显示,矿区深部及外围具有良好的找矿潜力,预测金资源量达200~300 t。为进一步揭示五龙沟金矿田深部控矿构造特征,科学评价深部找矿潜力,亟需开展精细的深部勘查研究,为实现该区域找矿突破提供理论和技术支撑。

前人对构造蚀变岩型金矿的成矿理论和勘查技术进行了系统研究,并取得丰硕成果。研究表明,构造蚀变岩型金矿作为最重要的金矿类型之

收稿日期:2025-11-08;**修订日期**:2026-04-15

基金项目:国家重点研发计划国际合作项目"复杂微细粒毒砂型金矿高效提质降杂关键技术研究"(编号:2023YFE0104100)和四川省区域创新合作项目"柴达木盆地大型金矿资源高效提质降杂新技术研究与示范"(编号:2022YFQ0074)联合资助

作者简介:李新本(1987—),男,青海民和人,高级工程师,从事矿山地质勘查技术管理及研究工作。E-mail:568487550@qq.com

*通信作者:俞国平(1992—),男,青海乐都人,工程师,从事矿山地质勘查技术工作。E-mail:2650323008@qq.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

一,其成矿作用与断裂构造密切相关,断裂构造不仅为成矿热液提供运移通道,也是Au元素沉淀富集的主要场所,准确识别控矿构造的深部特征是实现该类型金矿找矿突破的关键(陈衍景等,2007)。同时,研究人员提出了"三位一体"勘查区找矿预测理论,强调通过成矿地质体、成矿构造和成矿结构面研究,构建找矿预测地质模型,结合物化探综合分析方法推断矿体赋存位置,为深部找矿提供重要的理论指导(叶天竺等,2019)。在五龙沟金矿田研究方面,揭示该区域发育有微细脉型、蚀变岩型和石英脉型3种矿化类型,金矿化主要受控于晚期NW向脆性变形及相关断裂破碎带,大规模金成矿与古特提斯洋关闭及伴随的同碰撞/后碰撞构造—岩浆活动密切相关(李兴辉等,2025)。岩(矿)石物性测试成果显示,五龙沟金矿田矿体顶底板围岩与矿体赋存构造蚀变带岩石之间存在显著的电阻率差异(孙栋华等,2017),这为运用物探方法探查含金破碎蚀变带的空间延伸特征提供了重要的物性基础,也为指导深部钻探工程布设创造了有利条件。

五龙沟金矿位于东昆仑成矿带中段,已探明金资源量超过80 t,是青海省重要的黄金生产基地(李智明等,2020)。五龙沟金矿已发现多条金矿体严格就位于XI断裂带内或近构造带上下盘围岩中,金矿(化)体多形成于岩体与地层接触带的有利部位(马国栋等,2015)。五龙沟金矿以蚀变碎裂岩型为主,属于浅成低温热液型金矿床,是受剪切带控制的中低温热液构造蚀变岩型金矿床(钱壮志等,1997;崔廷军等,2012)。深水潭金矿经过15年的开采,近地表500 m空间金矿资源基本消耗殆尽,随着开采深度的增加,深部矿体品位降低、厚度变薄且连续性变差,无法保障年采90万t的生产目标。为切实保障矿业开发可持续性,必须开展深部地质勘查工作。然而,随着勘查深度的增加,控矿构造形态复杂、产状变化大及矿体空间定位困难等问题日益突出。

瞬变电磁法(TEM)因具有对低阻体敏感、探测深度大和分辨率高等优势,在金属矿产勘查中取得了显著成效(底青云等,2019a)。五龙沟矿区中深部控矿构造蚀变带沿倾向方向的延深特征尚未明确,这不仅制约了五龙沟金矿田深部找矿取得突破,也导致中深部找矿工作难以有效指导勘查工程的布设与实施。为进一步降低勘查工作风险,优化勘查方案部署,为充分挖掘矿区深部找矿潜力、拓宽资源远景、扩充资源储量并延长矿山服务年限,保障矿山企业可持续高质量发展,本研究开展大功率瞬变电磁法探测,融合地质调查、地球化学勘查等多源地质信息开展综合分析,有效提升深部矿体识别精度,实现良好找矿成效。通过开展大功率瞬变电磁法测量,结合地质和地球化学勘探等多元信息,旨在查明主控矿构造的深部展布特征,建立电性异常与矿化蚀变带之间的对应关系,从而构建综合找矿模型,为矿区深部勘探工程布设和实施提供科学依据,研究结果对矿区及外围深部控矿构造研究及探矿工程部署具有重要的指导意义。

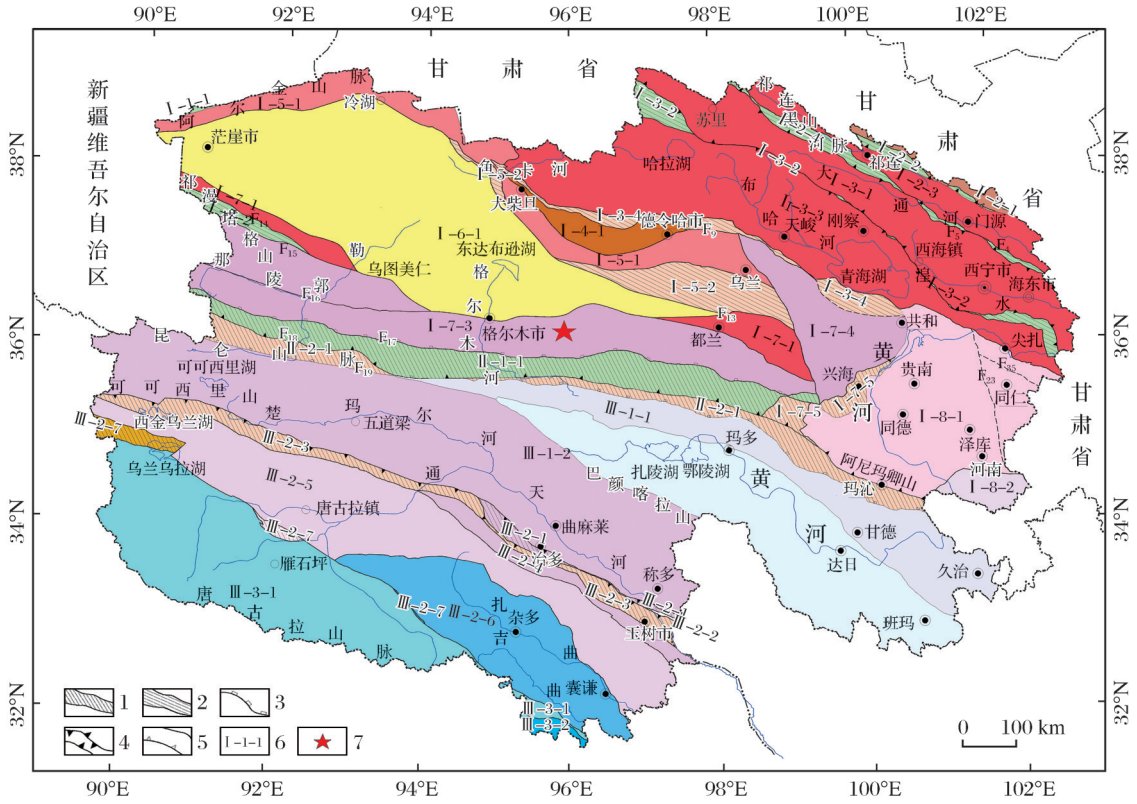
1 区域与矿区地质概况

1.1 区域地质背景

五龙沟金矿田处于东昆仑中段北坡五龙沟东侧,大地构造位置处于秦祁昆造山系—东昆仑造山带-Ⅰ-7-3昆北复合岩浆弧带内(图1)(青海省地质矿产勘查开发局,2021)。在区域上五龙沟金矿田夹持于昆北与昆中2条深大断裂之间。根据最新青海省成矿区带划分方案,五龙沟金矿田属东昆仑成矿带(Ⅲ-26)—伯喀里克—香日德成矿亚带(Ⅳ-26-2)—五龙沟金矿田,该成矿带经历了多期洋陆转换和弧(陆)—陆碰撞过程。这些大的区域构造活动奠定了东昆仑不同时期的构造格局,控制着不同时期的地层、构造和岩浆活动,进而决定了该区不同矿床差异的成矿地质背景,为区内成矿奠定了基础(范丽琨等,2009)。

1.2 矿区地质概况

矿区地层以古元古代金水口岩群白沙河岩组、新元古代青白口纪为主,其次为古元古代长城纪小庙组,沟谷和山前分布有大面积第四纪地层。矿区构造十分发育,主要有NWW、NW和NNW向断裂,大小断裂达10余条,其中规模较大且与成矿关系密切的断裂有4条(Ⅶ、Ⅸ、X和XI),这4条断裂带几乎呈平行带状分布,总体上形成宽度为1~2 km的断裂集聚区。矿区处于萤石沟—红旗沟脆韧性剪切带及断裂构造集中带的中东段,是五龙沟地区



1.板块对接带;2.蛇绿混杂岩带;3.板块对接断裂带及俯冲方向;4.早古生代造山系边界断裂及俯冲方向(一侧有齿为单向俯冲,两侧有齿为双向俯冲);5.晚古生代—中生代造山系边界断裂及俯冲方向,虚线为重要断裂带;6.构造单元编号;7.五龙沟金矿田位置;审图号:GS(2019)3266号,自然资源部监制

图1 五龙沟金矿田大地构造位置图

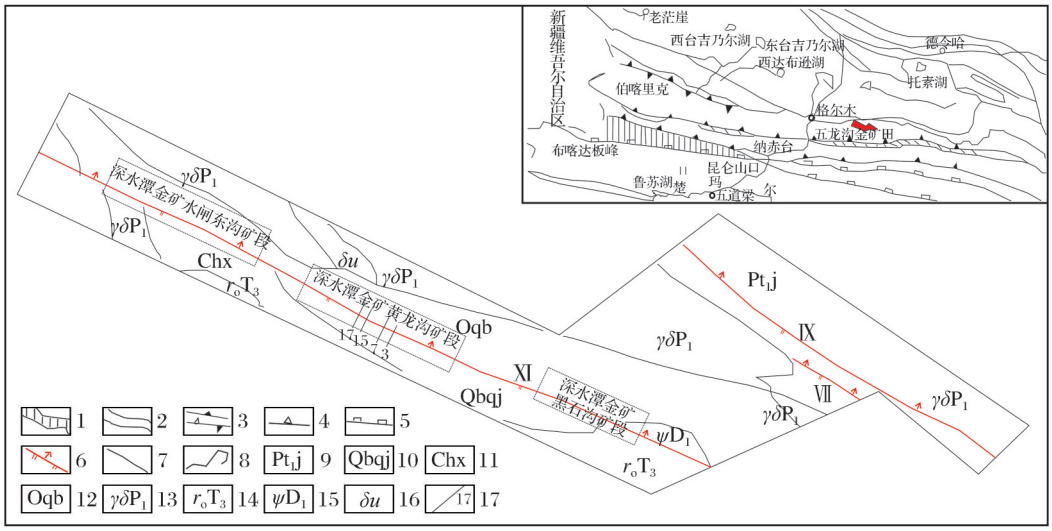
Fig. 1 Geotectonic location map of the Wulonggou gold ore field

重要的构造发育区,属于五龙沟地区三大重要控矿和成矿构造区带之一(陆露,2011;冯莉,2013;赵文婷,2013)。区内脆—韧性剪切带分布于水闸东沟—红旗沟—三窝水沟一线(冯莉,2013),延展长度约为7 km,宽度为300~500 m,总体走向为NW-SE,倾向N-NE。区内岩浆活动强烈,具有期次多和规模大的特征,其活动形式以岩浆侵入为主,其次为火山喷发(马忠元,2011;冯莉,2013;赵文婷,2013;周保辰,2015)。该区岩浆活动主要有古元古代、泥盆纪、二叠纪和三叠纪不同规模的岩浆侵入活动,岩体出露面积占矿区侵入岩总面积的60%以上,主要分布于青白口纪丘吉东沟组南西侧,呈岩基和岩株状产出,在与地层接触带处地层一侧多呈岩脉状产出。深水潭金矿区包括水闸东沟、黄龙沟和黑石沟3个矿段(图2)。围岩蚀变具有明显的分带性,自断裂中心向两侧依次发育有硅化—黄铁矿化带、绢云母—绿泥石化带和碳酸盐化带。其中,硅化、黄铁矿化与金矿化关系最为密切。目前矿区浅部(深度小于500 m)矿体已基本控制,但深部矿体延伸和构造特征尚不明确,制约了矿区资源量的进一步扩大。

2 岩(矿)石物性特征

研究区内金矿石主要赋存于构造蚀变带内,带内岩性主要为构造角砾岩和糜棱岩,构造带顶底板围岩为火成岩和变质岩,主要岩性为白云质大理岩、斜长花岗岩、石英片岩和凝灰岩,岩(矿)石物性测试结果见表1。

由表1可知,相较于围岩,构造角砾岩和糜棱岩的电阻率呈现为低阻,差异明显。围岩与赋矿构造蚀变岩石电性特征呈现高、低阻梯度变化,视电阻率表现为中阻;波速特征呈现高、低阻梯度变化,



1.主缝合带;2.次缝合带;3.新元古界—早古生界结合带;4.晚古生界—早中生界缝合带;5.A型俯冲带;6.实测逆断层;7.地质界线;8.水系;9.古元古代金水口岩群;10.青白口系丘吉东沟组;11.长城系小庙组;12.奥陶系祁曼塔格变火山岩组;13.早二叠世花岗闪长岩;14.晚三叠世斜长花岗岩;15.早泥盆世辉石岩;16.闪长玢岩脉;17.勘探线位置及编号

图2　五龙沟金矿田深水潭金矿区地质简图

Fig. 2　Simplified geological map of the Shenshuitan gold mine in the Wulonggou gold ore field

表1　深水潭金矿岩（矿）石物性特征统计

Table 1　Statistical of physical properties of rocks（ores） in the Shenshuitan gold mine

岩性	密度变化值/(g·cm^{-3})	密度平均值/(g·cm^{-3})	电阻率变化值/(Ω·m)	电阻率平均值
白云质大理岩	2.641~2.832	2.731	613~7 990	2 846
斜长花岗岩	2.616~2.632	2.656	1 116~9 224	4 680
凝灰岩	2.486~2.454	2.470	511~3 034	1 325
构造角砾岩	2.514~3.053	2.761	155~6 520	1 053
糜棱岩	2.747~2.749	2.748	163~186	173
石英片岩	2.837~2.887	2.862	442~645	533

波速值表现为中速。上述明显的物性分异特征是该区找寻断裂带(矿化带)的重要标志。

3　研究方法

3.1　方法原理

瞬变电磁法的核心原理是基于电磁感应现象:通过地面的发射线圈(或接地导线)向地下施加一次脉冲磁场,当一次磁场突然断开时,地下导电介质会因磁通量变化产生感应涡流,涡流又会激发二次磁场。二次磁场的强度与衰减速度取决于地下介质的电导率、磁导率及地质体形态的规模,导电地质体中的涡流衰减缓慢,形成可观测的异常响应(底青云等,2019b)。

3.2　数据采集

本次工作采用HPTEM-28高精度瞬变电磁系统,其原理是等值反磁通瞬变电磁法,这是一种基于等值反磁通原理的瞬变电磁法,采用上下平行共轴的2个相同线圈通以反向电流作为发射源,并在该双线圈源合成的一次场零磁通平面上,测量对地中心耦合的纯二次场。这种方法能够有效消除接收线圈本身的感应电动势,从而获得地下纯二次场的响应。理论推导和数值计算证明,相比传统瞬变电磁法采用的单线圈源,该方法采用的双线圈源对地中心耦合场能量更集中,因而有利于减少旁侧影响,提高探测的横向分辨率。本次采用等效400 m×400 m发射回线,发射电流达15 A,选取频率为0.250 Hz和0.625 Hz进行对比测量,这2种频率

探测深度均达500 m以深。经过频率试验选取0.625 Hz开展工作，井下选取0.625 Hz进行80次和140次叠加对比测量，再经过试验选取150次叠加开展工作，测点点距为20 m，测量网格覆盖矿区主要构造带，共布设测线4条，测点163个，确保了数据的空间连续性。本次数据由HPTEM-28高精度瞬变电系统采集，该设备具备独特的二次场响应特征、优良的关断性能，同时搭载近源场与零磁通专属硬件结构，仅配套HPTEM专用反演软件可实现数据精准建模与校正处理。为保证反演结果真实可靠且符合规范，必须采用HPTEM系统软件进行反演处理。

3.3 数据处理

SOTEM数据处理流程为原始数据→预处理（质量检查/去噪/关断校正）→近源效应校正→视电阻率转换→一维反演→二维/三维成像→地质解释。SOTEM数据处理流程以“数据驱动—物理约束—数值优化”为核心逻辑：去噪环节通过多方法协同保障信号质量，视噪声提升为后续处理奠定基础；视电阻率计算通过物理转换与优化算法实现非线性问题的高效求解；反演成像则通过跨域融合提升模型可靠性。这一全流程形成了从信号预处理到地下电性结构反演的全链条技术体系，为深部资源勘探与地质结构探测提供了重要的技术支撑。其关键步骤如下：

（1）多尺度噪声协同抑制策略：瞬变电磁法（SOTEM）观测的瞬变感应电压信号具有宽频带、强衰减和非平稳的特征，而研究区人为活动产生的电磁干扰（如工业谐波和电力线脉冲）常表现为局部畸变，并在衰减曲线晚期（对应深部响应）导致信噪比显著下降。为此，采用小波去噪与五点圆滑互补技术：小波变换通过多尺度分解将信号分离为不同频带分量，可针对性剔除高频噪声主导的突变分量，适配瞬变电磁信号的非平稳特性；五点圆滑（滑动窗口平均）则在小波去噪后进一步平滑局部残留噪声，有效避免晚期曲线出现虚假振荡，实现“多尺度噪声抑制+信号趋势保护”的协同效果。

（2）全期视电阻率的非线性求解方法：瞬变电磁法（SOTEM）观测的垂直感应电动势与地下电阻率呈非单调映射关系，其根源在于晚期信号对应深部地层的涡流响应机制复杂。为实现视电阻率的精准计算，首先将感应电动势积分转换为垂直磁感应强度，消除电动势对时间的微分效应，使信号与电阻率的关系趋于单调。在此基础上，基于回线源/电性源的全期视电阻率理论曲线，采用二分法迭代求解，并以垂直磁场倒数为拟合目标，显著降低非线性程度，同时将收敛阈值控制在10^{-6}量级，确保计算精度（迭代次数小于等于20次）与效率的平衡。

（3）跨域融合的一维反演成像技术：瞬变电磁法（SOTEM）时间域数据与大地电磁法（MT）频率域数据在地下电性结构响应上具有物理同源性，据此采用拟MT法实现跨域映射：基于同一地层模型下SOTEM与MT视电阻率曲线的相似性，通过最小二乘法建立时间（t）与频率（f）的对应关系（如$f \propto 1/t$），将时间域数据转换至频率域；随后引入MT反演中的OCCAM算法（最光滑模型反演法），以“模型粗糙度最小”为约束，通过偏差原理控制拟合残差，避免传统反演对初始模型的依赖，同时抑制多解性导致的过度解释，适配SOTEM数据“晚期信噪比低”的特点，实现高精度一维分层反演。

4 结果及分析

4.1 解译推断原则

岩性电阻率特征的应用，本质是将“微观电性机理”转化为“宏观地质解释”的过程。通过标志电性层的识别与地质—电性耦合分析，构建了“物理本质—特征提取—地质验证”的全链条解释体系，为深部地层划分提供了可靠的技术支撑。本次剖面解释，针对视电阻率的变化情况，来推断剖面中岩性变化情况。结合地球物理特征及地质资料，地层及岩性划分原则如下：

断裂构造的视电阻率响应是岩石变形、介质充填与应力场演化共同作用的电性表征，其在断面图上的特征与断裂的力学类型、产状及规模形成精准映射，为地质勘探提供了关键的电性识别依据。

垂直断裂走向的低阻带/等值线梯级带，对应张性或压性断裂的电性响应：断裂带内岩石破碎形成的裂隙网络被泥质或地下水充填，与两侧完整地层形成显著电阻率反差，梯级带的陡度反映电性变化梯度，直接对应破碎带的发育程度。

“U”型/“V”型低阻区是断裂破碎带的典型电性标志:“U”型对应断裂扩容带的松散堆积特征,“V”型则反映断裂的倾斜延伸产状,二者均源于破碎岩石孔隙度增大与充填介质导电性增强的耦合效应,常见于正断层和逆断层的破碎带。

平推断层的识别依赖等值线同向扭曲/线性异常错断:岩石沿走向的水平剪切导致电性界面发生空间错位,原本连续的线性电性标志层出现错断或转折,其核心是地层水平位移引发的电性界面重构,而非电阻率突变,具有明显的线性错动特征。

穿脉巷位于断裂破碎带内,基岩破碎,其电性特征整体呈现中低阻,断裂破碎主界面附近绿泥石化发育,电阻率曲线呈现“V”字形异常,强蚀变带多位于主界面下盘。上述电性特征为本次井下物探推断的依据。断裂构造发育区的视电阻率降低及厚度、深度参数变化,是岩石破碎、介质充填和应力场演化共同作用的电性表征。通过解析其内在机理,可实现对断裂带规模、产状和充填特征的精准识别。

构造破碎带是构造蚀变岩型金矿的主要控矿和容矿构造,其发育规模和形态直接决定着矿体的分布范围。由于破碎带内岩石裂隙发育,常充填黄铁矿和黄铜矿等导电矿物或地下水,在瞬变电磁剖面中表现为连续或断续的低阻异常带,与周围高阻未破碎围岩形成明显界限(刘建明等,2017)。

4.2 二次场响应曲线

通过绘制4条测线瞬变电磁法二次场感应电动势(dB_z/dt)随时间延时的衰减曲线可知,曲线早期反映浅部地层电性特征,中晚期反映深部地层电性特征;低阻体对应信号强度高、衰减慢,高阻体对应信号强度低、衰减快。4条测线均表现为“浅部低阻、深部高阻”的电性结构,4条测线二次场响应曲线如图3所示。区内广泛发育含金硫化物矿化和蚀变破碎带,这类地质体在时间域电磁法观测中通常伴随显著的激发极化效应(激电效应)。激电效应会使二次场衰减曲线发生畸变,尤其在深部低阻矿化带和构造蚀变带部位表现更为突出,可能导致视电阻率计算偏差及反演结果异常。本次工作中,浅部地层因岩性相对单一、矿化程度较弱,激电效应对数据的影响有限;深部构造与金矿化部位易出现明显的激电响应叠加,对电磁信号形态和反演电阻率结构产生一定的干扰。为提升数据解释的可靠性,后续可开展激电效应实测与校正分析,通过对比观测数据明确激电效应对瞬变电磁响应的影响程度,进一步提高反演结果和地质解释的准确性。

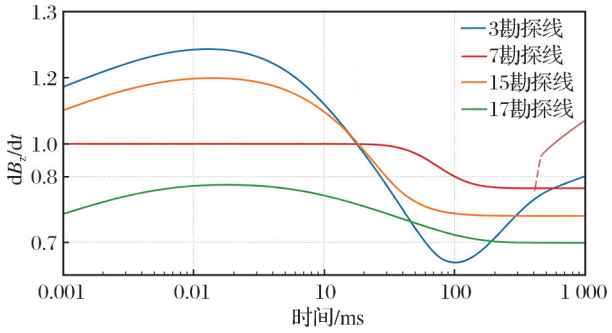


图3 TEM二次场响应曲线

Fig. 3 TEM secondary field response curves

4.3 成果解译

瞬变电磁法的反演结果(地电模型)需结合地质背景进行综合解译,避免单一依据电性异常推断构造与矿化。综合本次4条勘探剖面成果可知,井下穿脉巷道均揭露于断裂破碎带内。以此为基础,结合穿脉巷道已控制矿体特征、找矿靶区地球物理响应规律与资料解译推断原则开展综合分析,对区内工作剖面的断裂破碎带主界面和强蚀变带进行推断解译。

(1)17勘探线。断裂破碎带主界面:推断1处,编号为F_1。F_1位于剖面0~85 m,倾角较陡,近90°,向下延伸大。高程2 750 m处,倾角具有变缓趋势;在高程2 700~2 800 m区域,宽度相对变大。

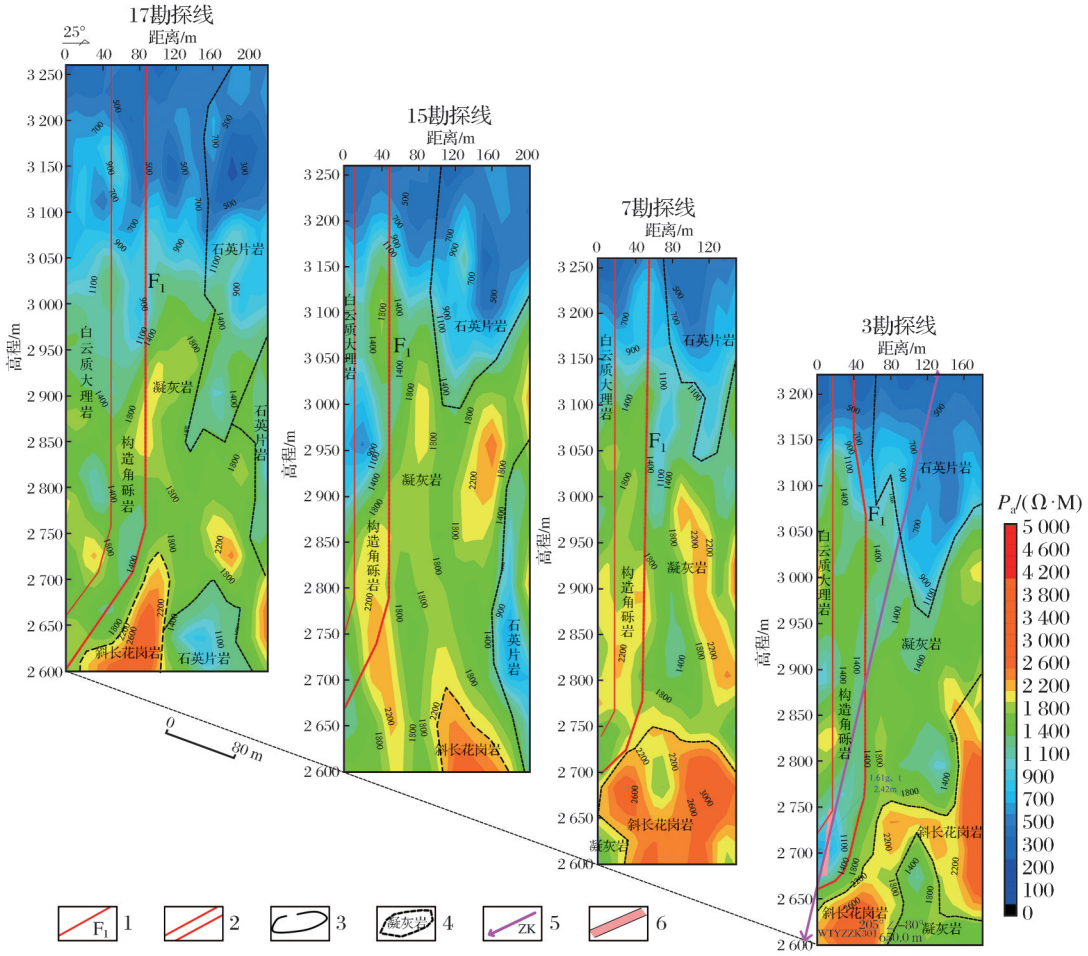
(2)15勘探线。断裂破碎带主界面:推断1处,编号为F_1。F_1位于剖面0~45 m,倾角近90°,向下延伸大。高程2 750 m处,倾角变缓趋势明显。强蚀变带:位于F_1下盘,剖面内宽度为0~45m,在高程2 700~2 800 m区域,宽度约为45 m。

(3)7勘探线。断裂破碎带主界面:推断1处,编号为F_1。F_1位于剖面10~55 m,倾向N,倾角近90°,向下延伸大。高程2 750 m处,倾角具有变缓趋势。强蚀变带:位于F_1下盘,剖面内宽度为15~50 m,在高程2 700~2 800 m区域,宽度约为40 m。

(4)3勘探线。断裂破碎带主界面:推断1处,编号为F_1。F_1位于剖面20~55 m,倾向N,倾角近90°,向下延伸大;高程2 750 m处,倾角具有变缓趋势。强蚀变带:位于F_1下盘,剖面内宽度为0~45 m,

在高程2 700~2 800 m区域，宽度约为45 m。

综上可知，推断F_1为糜棱岩或构造角砾岩带（南段）与凝灰质岩带（北段）接触带位置，在高程2 700~2 800 m变缓趋势明显。强蚀变带宽度在高程2 700~2 800 m变宽趋势明显，矿脉多位于断裂带主界面上盘强蚀变带内，如图4所示。



1.推测断裂主界面；2.推测强蚀变带范围；3.视电阻率等值线及标注；4.岩性解译标注；5.验证钻孔；6.揭露矿体

图4　瞬变电磁法解译联合剖面图

Fig. 4　Joint interpretation section map of transient electromagnetic method

5　钻孔验证

不同性质和规模的断裂构造往往是岩浆和成矿流体的通道和聚集场所，起到控矿、控岩的作用，平面上断层走向发生变化或扭曲的转弯处，剖面上扭性断裂倾角由缓变陡和压扭性断裂由陡变缓，这些部位往往是有利于成矿的构造部位（阳正熙，2006）。根据物探解译成果，选择对3线剖面深部断裂构造产状变化处进行钻探验证，验证标高为2 700 m，低阻异常为构造蚀变带，带内金矿体工程平均品位为1.61×10^{-6}，真厚度为2.42 m，进一步扩大了资源远景，为深部勘查提供了方向和依据。

6　结论

（1）五龙沟金矿田深水潭矿区黄龙沟矿段赋矿构造角砾岩、糜棱岩与顶底板围岩存在明显的电阻率差异，含金破碎蚀变带呈典型低阻响应，为瞬变电磁法开展深部构造探测提供了良好的物性前提，验证了在该区域以低阻异常识别控矿断裂和矿化蚀变带的技术思路是切实可行的。

(2)瞬变电磁法有效圈定了矿区主控矿断裂F_1的深部展布特征,查明该断裂在2 700~2 800 m标高处产状由陡变缓,并存在倒转现象,下盘强蚀变带同步加宽,金矿体主要赋存在断裂上盘强蚀变带内,明确了深部矿体的空间赋存规律和定位标志。

(3)基于物探解译成果实施的钻探验证工程,在3勘探线剖面2 700 m标高低阻异常区内成功揭露金矿体,工程平均品位为1.61×10^{-6},真厚度为2.42 m,证实了运用瞬变电磁法探测深部控矿断裂和隐伏金矿体的有效性,为矿区新增资源量及扩大找矿远景提供了依据。

(4)本研究形成的"井下瞬变电磁探测+地质约束反演+钻探验证"深部找矿技术组合,有效解决了高海拔地区构造蚀变岩型金矿深部构造形态复杂和矿体定位困难的勘查难题,为五龙沟金矿田及东昆仑成矿带同类金矿床的中深部勘查提供了技术参考和示范。

(5)瞬变电磁法在五龙沟金矿区的成功应用,不仅为矿区深部钻探工程布设提供了精准指导,保障了矿山资源接续与可持续开发,也为高海拔及构造复杂区隐伏构造蚀变岩型金矿的深部找矿提供了新思路和新方法,具有重要的推广应用价值。

参考文献(References):

陈柏林,2019.东昆仑五龙沟金矿田地质特征与成矿地质体厘定[J].地质学报,93(1):179-196.Chen Bailin,2019.Geological characteristics of the Wulonggou gold ore field and determination of metallogenic geological bodies in East Kunlun Mountains[J].Acta Geologica Sinica,93(1):179-196.

陈衍景,倪培,范宏瑞,等,2007.不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J].岩石学报,(9):2085-2108.Chen Yanjing,Ni Pei,Fan Hongrui,et al,2007.Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J].Acta Petrologica Sinica,(9):2085-2108.

崔廷军,雷延军,傅星,2012.青海五龙沟金矿田成因模式浅析[J].矿产勘查,3(5):644-649.Cui Tingjun,Lei Yanjun,Fu Xing,2012.Analysis on metallogenic model of Wulonggou gold deposit field,Qinghai[J].Geotechnical Engineering World,3(5):644-649.

底青云,王妙月,段中山,2019a.瞬变电磁法在矿产资源勘查中的应用进展[J].地球物理学报,62(5):1876-1892.Di Qingyun,Wang Miaoyue,Duan Zhongshan,2019a.Application progress of the transient electromagnetic method in mineral resource exploration[J].Chinese Journal of Geophysics,62(5):1876-1892.

底青云,朱日祥,薛国强,等,2019b.我国深地资源电磁探测新技术研究进展[J].地球物理学报,62(6):2128-2138.Di Qingyun,Zhu Rixiang,Xue Guoqiang,et al,2019b.New development of the Electromagnetic(EM)methods for deep exploration[J].Chinese Journal of Geophysics,62(6):2128-2138.

范丽琨,蔡岩萍,梁海川,等,2009.东昆仑地质构造及地球动力学演化特征[J].地质调查与研究,(3):181-186.Fan Likun,Cai Yanping,Liang Haichuan,et al,2009.Characters and evolution of the geodynamics in the eastern Kunlun[J].Geological Survey and Research,(3):181-186.

冯莉,2013.红旗沟—深水潭金矿床地质特征及资源量估算[D].北京:中国地质大学(北京).Feng Li,2013.Geological characteristics and resource estimation of Hongqigou-Shenshuitan gold deposit[D].Beijing:China University of Geosciences(Beijing).

李兴辉,梁改忠,吴金检,等,2025.东昆仑成矿带两期金成矿—岩浆—构造作用[J].岩石学报,41(2):526-543.Li Xinghui,Liang Gaizhong,Wu Jinjian,et al,2025.Two periods of gold mineralization-magmatism-tectonism in the East Kunlun metallogenic belt[J].Acta Petrologica Sinica,41(2):526-543.

李智明,张雨莲,王斌,等,2020.东昆仑五龙沟金矿田构造控矿规律与找矿预测[J].地质学报,94(6):1914-1930.Li Zhiming,Zhang Yulian,Wang Bin,et al,2020.Structural ore-controlling regularity and prospecting prediction of the Wulonggou goldfield in the East Kunlun[J].Acta Geologica Sinica,94(6):1914-1930.

刘建明,叶杰,张庆洲,2017.辽东地区构造蚀变岩型金矿的控矿构造特征[J].地质学报,91(8):1854-1868.Liu Jianming,Ye Jie,Zhang Qingzhou,2017.Ore-controlling structural characteristics of the tectono-altered rock-type gold deposits in the Liaodong area[J].Acta Geologica Sinica,91(8):1854-1868.

陆露,2011.东昆仑五龙沟金矿构造控矿特征研究[D].北京:中国地质科学院.Lu Lu,2011.Study on the structural ore-controlling characteristics of the Wulonggou gold deposit in the East Kunlun[D].Beijing:Chinese Academy of Geological Sciences.

马国栋,韩玉,陈苏龙,等,2015.青海五龙沟地区金多金属

矿成矿规律[J]. 金属矿山，44(10)：110-115. Ma Guodong, Han Yu, Chen Sulong, et al, 2015. Metallogenic regularity of the gold-polymetallic deposits in Wulonggou area, Qinghai Province[J]. Metal Mine, 44(10): 110-115.

马忠元，2011. 东昆仑水闸东沟—黄龙沟金矿床地质、矿物学特征及岩石变形特征分析[J]. 青海科技，18(3)：17-22. Ma Zhongyuan, 2011. Analysis of geological, mineralogical and rock deformation characteristics of Donggou-Huanglonggou gold deposit in Shuizha, east Kunlun[J]. Qinghai Science and Technology, 18(3): 17-22.

毛先成，王琪，陈进，等，2020. 胶西北金矿集区深部成矿构造三维建模与找矿意义[J]. 地球学报，41(2)：166-178. Mao Xiancheng, Wang Qi, Chen Jin, et al, 2020. Three-dimensional modeling of deep metallogenic structure in northwestern Jiaodong Peninsula and its gold prospecting significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 166-178.

钱壮志，李厚民，胡正国，1997. 青海五龙沟地区金矿控矿构造研究[J]. 西安工程学院学报，(增刊1)：27-32. Qian Zhuangzhi, Li Houmin, Hu Zhengguo, 1997. Study of structures controlling gold deposites in Wulonggou areas, Qinghai Province[J]. Journal of Xi'an Engineering University, (Suppl.1): 27-32.

青海省地质矿产勘查开发局，2021. 中国矿产地质志·青海卷[M]. 西宁：青海省地质矿产勘查开发局. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Qinghai Province, 2021. China mineral geology·Qianghai Volume[M]. Xining: Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Qinghai Province.

宋明春，2017. 对我国深部金矿资源勘查有关问题的认识与思考[J]. 黄金科学技术，25(3)：1-2. Song Mingchun, 2017. The relevant issues of deep gold deposit exploration in China[J]. Gold Science and Technology, 25(3): 1-2.

孙栋华，李怀渊，江民忠，等，2017，时间域航空电磁、航磁在五龙沟金矿整装勘查区中的应用研究[J]. 地球物理学进展，32(6)：2533-2544. Sun Donghua, Li Huaiyuan, Jiang Minzhong, et al, 2017. Applications of time domain airborne electromagnetic and aeromagnetic in Wulonggou gold deposit exploration area[J]. 地球物理学进展，32(6)：2533-2544.

滕吉文，薛国强，宋明春，2026. 第二深度空间金矿勘查的探索、实践与展望[J]. 岩石学报，42(7)：2305-2318. Teng Jiwen, Xue Guoqiang, Song Mingchun, 2026. Exploration, practice, and prospects of gold prospecting in second depth space[J]. Acta Petrologica Sinica, 42(7): 2305-2318.

阳正熙，2006. 矿产资源勘查学[M]. 北京：科学出版社. Yang Zhengxi, 2006. Mineral resource exploration[M]. Beijing: Science Press.

叶天竺，陈毓川，王瑞江，等，2015. 全国矿产资源潜力评价工作报告[R]. 北京：中国地质调查局. Ye Tianzhu, Chen Yuchuan, Wang Ruijiang, et al, 2015. Work report on national mineral resources potential evaluation[R]. Beijing: China Geological Survey.

叶天竺，吕志成，庞振山，等，2019. 我国深部找矿研究进展与展望[J]. 地质通报，38(4)：529-541. Ye Tianzhu, Lü Zhicheng, Pang Zhenshan, et al. 2019. Research progress and prospect of deep mineral exploration in China[J]. Geological Bulletin of China, 38(4): 529-541.

赵伟策，赵晓波，赵呈祥，等，2023. 东昆仑五龙沟金成矿系统：基本特征、成矿控制与勘查标志[J]. 地质科学，58(2)：635-661. Zhao Weice, Zhao Xiaobo, Zhao Chengxiang, et al, 2023. The Wulonggou gold system in East Kunlun Orogen: geological characteristics, metallogenic controls and prospecting criteria[J]. Chinese Journal of Geology, 58(2): 635-661.

赵文婷，2013. 基于Micromine的三维地质建模及储量估算研究——以东昆仑五龙沟金矿为例[D]. 北京：中国地质大学(北京). Zhao Wenting, 2013. Research on Micromine-based 3D orebody modeling and estimated reserves—A case from Wulonggou gold mine in East Kunlun Mountain[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).

周保辰，2015. 青海省五龙沟金矿资源与环境联合评价[D]. 北京：中国地质大学(北京). Zhou Baochen, 2015. Resources and environment joint evaluation on the Wulonggou gold mine of Qinghai Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing).

Application of Transient Electromagnetic Method in Structural Extension Prediction of High-Altitude Gold Deposits

LI Xinben[1,2], YU Guoping[1,2]

1.*The 6th Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Geermu* 816000, *Qinghai, China*;

2.*Dulan Jinhui Mining Co., Ltd., Geermu* 816000, *Qinghai, China*

Abstract: The Wulonggou gold orefield is situated in the central segment of the East Kunlun Orogenic Belt and is characterized by meso-epithermal magmatic hydrothermal deposits and tectonic altered rock-type gold deposits. The spatial distribution, scale, and morphology of all identified gold orebodies in this region are stringently regulated by fractured tectonic alteration zones. These fracture alteration zones act as favorable conduits for the migration of ore-forming fluids and serve as primary sites for gold precipitation and enrichment. In recent years, the shallow mineral resources within the mining area have been progressively exhausted, prompting a shift in exploration activities towards the middle and deeper levels. However, the extension patterns of deep ore-controlling structures remain ambiguous, and the accurate localization of concealed orebodies presents significant challenges, thereby hindering substantial prospecting advancements in this region. To systematically elucidate the developmental characteristics of deep ore-controlling structures and objectively assess the deep gold prospecting potential of the mining area, this study conducts comprehensive research utilizing previously collected systematic physical property test data of rocks and ores. The statistical analysis of physical properties highlights a significant resistivity contrast between the intact wall rocks located at the roof and floor of ore bodies and the rocks within the ore-hosting fractured alteration zones. These fractured alteration zones, characterized by well-developed fractures filled with conductive minerals and groundwater, typically exhibit low-resistivity electrical signatures. This results in distinct electrical boundaries when compared to the high-resistivity wall rocks. Such differentiation provides a crucial physical basis for tracing deep tectonic alteration zones through electromagnetic geophysical prospecting in the study area. By leveraging this electrical differentiation, the implementation of suitable geophysical detection technologies in the middle and deep mining areas can accurately delineate the deep extension, variation in occurrence, and spatial scale of gold-bearing fractured alteration zones. Consequently, this approach offers robust scientific support for the precise planning and optimization of deep drilling verification projects. In this study, the transient electromagnetic method (TEM) was employed to perform subsurface detection tests aimed at identifying concealed deep structures within the middle and deep sections of the Huanglonggou ore block at the Shenshuitan gold mine. Four geophysical survey profiles were systematically arranged underground in the Huanglonggou ore block to ensure comprehensive coverage. Analysis of the collected data reveals that various fractured tectonic alteration zones in the study area exhibit distinct and pronounced low-resistivity anomaly responses. By integrating multiple sources of information, including underground engineering logs, surface geological data, and rock-ore physical property characteristics, the spatial relationships and distribution patterns among faults, gold-bearing mineral enrichment zones, and low-resistivity electrical anomalies within the ore block have been preliminarily elucidated. Guided by the structural ore-controlling theory, verification boreholes were strategically positioned at favorable metallogenic sites where the orientation of fractured alteration zones transitions significantly from steep to gentle. Industrial gold orebodies were successfully identified within the low-resistivity anomaly targets delineated by transient electromagnetic method (TEM). The drilling results conclusively demonstrate the

technical superiority of TEM in detecting and tracing deep-seated, concealed ore-controlling faults, confirming its effectiveness and practicality for deep gold exploration in the study area. The integrated research framework developed in this study, which combines underground TEM detection, joint geological interpretation, and drilling validation, provides detailed and reliable geological and geophysical data essential for subsequent mid- to deep-level mineral exploration in the Wulonggou gold orefield. Additionally, it offers practical guidance for the precise localization and quantitative prediction of concealed gold orebodies in regions characterized by well-developed mid- to deep-level alteration zones. This study also presents valuable technical insights and practical case studies for the deep exploration of similar high-altitude, tectonically altered rock-type gold deposits within the East Kunlun Orogenic Belt and other analogous regions globally.

Key words: structural altered rock type gold deposit; ore-controlling structure; concealed orebodies; transient electromagnetic method; low-resistivity anomaly; Wulonggou gold orefield