doi: 10.11720/wtyht.2026.0026
高坡, 胡杰, 张叶鹏, 等. 综合物探方法在冈底斯东段帮浦矿区深部找矿中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 432-440. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0026
Gao P, Hu J, Zhang Y P, et al. Application of integrated geophysical prospecting to deep mineral exploration in the Bangpu mining area, eastern Gangdese metallogenic belt[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 432-440. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0026

综合物探方法在冈底斯东段帮浦矿区深部找矿中的应用

高坡[1], 胡杰[2,3], 张叶鹏[4], 戴雪灵[5], 旦巴永忠[3]
(1. 西藏金和矿业有限公司, 西藏 拉萨 851400; 2. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 四川 成都 610059; 3. 西藏地质三队地矿有限公司, 西藏 拉萨 851400; 4. 湖南省国土空间调查监测所, 湖南 长沙 410129; 5. 湖南省矿产资源集团, 湖南 长沙 410129)

摘 要: 帮浦矿区是冈底斯成矿带东段典型斑岩—矽卡岩型矿床, 斑岩体外围浅部的矽卡岩型矿体已基本采空, 急需寻找深部接替资源。为进一步查明研究区深部隐伏岩体及周边矿体的空间分布, 实现找矿突破, 本文对帮浦矿区东部区域开展了 1∶1 万重力、高精度磁法测量以及大地音频电磁测量, 并对物探异常原因进行分析总结。综合物探测量显示, 研究区中部高重力异常区和低重力异常区分别对应着中基性和中酸性隐伏岩体, 南西侧两处磁异常可能为矽卡岩周边的磁铁矿、磁黄铁矿引起的矿致异常。结合 AMT 测量结果, 在高重力异常边部的低电阻区和强磁、中重力、低电阻异常区布设了钻孔以探索深部岩体和周边矽卡岩型矿体, 并成功探获铜矿带(体)两条、铅锌矿体两条。勘查成果表明: 高精度重力、磁法测量结合大地音频电磁测量的物探方法在西藏帮浦矿区寻找深部隐伏矿体具有良好的效果, 是本区域同类型矿床深部找矿的有效物探勘查技术组合。

关键词: 冈底斯东段; 帮浦矿区; 重力测量; 高精度磁法测量; AMT 测量; 斑岩—矽卡岩型矿床
中图分类号: P31; P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0432-09

0 引言

冈底斯斑岩铜多金属成矿带分布着朱诺、吉如、冲江、厅宫、达布、驱龙、甲玛和帮浦等一系列大型—超大型矿床, 该成矿带已经成为我国最为重要铜资源基地[1]。帮浦矿区是位于该成矿带东段北缘的大型斑岩—矽卡岩—浅成低温热液型矿床[2], 其查明的钼、铅锌矿均达到大型规模, 银、铜、金矿也有达到大型规模的潜力。根据前人的勘查成果, 帮浦矿区含矿斑岩体富 Mo 而贫 Cu, 斑岩体内钼铜矿资源量已经查明。外围矽卡岩型铅锌矿分布于岩体东部大理岩和火山岩交界的“硅钙面”附近, 浅成低温热液型矿体呈脉状小规模分布于断层(层间)破碎带中[3]。多年的开采使得浅部铅锌矿体基本采空, 而以往发现的浅成低温热液型铅锌矿体多呈脉状、小透镜状, 连续性差, 开采成本高, 斑岩体外围的矿山企业面临资源枯竭的风险, 寻找接替资源迫在眉睫。近年来的勘查工作发现, 矿体周边岩体(脉)发育, 矿体及围岩中的深色石榴子石、磁铁矿、磁黄铁矿等近端矽卡岩指示矿物随着深度增加而增加, 因此笔者团队提出研究区内可能存在“双(多)热源中心”, 并指出下阶段工作重点应利用矿体与围岩的电磁重力物性差异特征, 查明深部的隐伏岩体及矿体的空间分布, 实现矿体的快速定位, 达到勘查增储的目的。

研究区以往开展的物探工作主要为大功率激电剖面和测深测量, 该方法对于埋深较浅的矿体具有一定的效果, 成功探获到两条小规模脉状铅锌矿体, 但深部找矿效果欠佳。单一的物探手段在本矿区的

收稿日期: 2026-01-26; **修回日期:** 2026-03-30
基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1002100)、西藏自治区“高层次人才”资助项目(XZDKJ2025KY02)
第一作者: 高坡(1984-), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事矿床地质及矿床构造研究工作。Email: 253201269@qq.com
通讯作者: 胡杰(1984-), 男, 高级工程师, 在读博士, 主要从事矿产勘查及矿床地质研究工作。Email: 106862386@qq.com

使用已证明其存在一定的局限性, 难以对地下地质构造、岩体分布以及矿体位置进行精确定位和合理解释[4-5]。因此, 笔者团队根据研究区地质特征, 采用多物探手段进行综合勘查, 开展 1∶1 万重力、高精度磁测及 AMT 剖面测量, 全面收集研究区的重磁电等物性特征, 并通过数据处理、反演及综合研究, 圈定出深部矽卡岩型、热液型以及隐爆角砾岩下部岩体可能分布范围, 为钻孔布设提供地球物理依据, 实现矿山增储。

1　地质背景

青藏高原位于我国西南部, 被誉为“世界屋脊”和“地球第三极”, 其形成过程与印度—亚洲板块的碰撞密切相关[6]。冈底斯成矿带是青藏高原白垩纪以来岩浆活动期次最多、规模最大、岩浆类型最复杂的构造—岩浆岩带, 也是我国最大的铜多金属勘查开发基地[7-8], 该成矿带被洛巴堆—米拉山断裂(图 1a)分为南部的拉达克—南冈底斯—下察隅岩浆弧(又称“南部拉萨地块”)和北部的隆格尔—念青唐古拉复合岛弧带(又称“中部拉萨地块”)[9-10], 研究区则位于南北带交界处(图 1b)。

研究区出露地层有晚古生代、早中生代以及新生代以来的沉积、火山岩地层, 由老到新分别为石炭—二叠西松多岩群(C-P*s*)变火山沉积岩, 下—中侏罗统叶巴组($J_{1\text{-}2}y$)强变形弱变质的火山角砾岩、凝灰岩、碳质板岩, 上侏罗统确桑温泉组(J_3q)砂砾岩沉积, 古新统典中组(E_1d)火山岩以及第四系(图 2)。区内构造主要以 NW 向、NE 向断裂为主, NW 向断裂多为与区域伸展或新生代岩浆岩活动有关的一系列滑脱断层, 形成了区内近 EW 向控岩—控矿运移存储空间。研究区南部大面积发育的黑云二长花岗岩体形成时间为(62.2±0.32)Ma[11], 而与成矿关系密切的主要为始新世二长花岗斑岩、闪长玢岩、花岗斑岩, 石英斑岩等, 大量锆石 U-Pb 年龄显示这些岩体形成时间主要介于 13.90~15.43 Ma 之间[12-15]。此外, 在研究区北西部还发育有辉绿玢岩[16-17], 这些辉绿岩基本与成矿无关。研究区围岩蚀变类型主要有钾化、绢云母化、硅化、角岩化、矽卡岩化、青磐岩化、矽卡岩化、碳酸盐化等, 各类蚀变是相互交叉重叠的, 尤其是磁铁矿化、磁黄铁矿化, 其与矽卡岩型铅锌、铜矿关系密切。研究区目前主要开采Ⅰ、Ⅱ号矿体, Ⅰ号矿体为顺 F1 断层(“硅钙面”)分布的矽卡岩型矿体, 矿体浅部主要为铅锌银矿体, 矽卡岩化较弱, 海拔 4 750 m 以下矽卡岩化逐渐增强, 铅锌品位逐渐降低、铜金矿开始变富。Ⅱ号矿体则严格受 F2 断层破碎带控制, 为区内典型的低温热液型铅锌矿体, 品位也较Ⅰ号矿体低。Ⅵ号铅锌矿体则赋存于大理岩内部层间破碎带中, 其产状与围岩一致, 而隐爆角砾岩型(Ⅻ号)矿体则严格分布于隐爆角砾岩筒内部, 矿化类型有铅锌银铜金等。

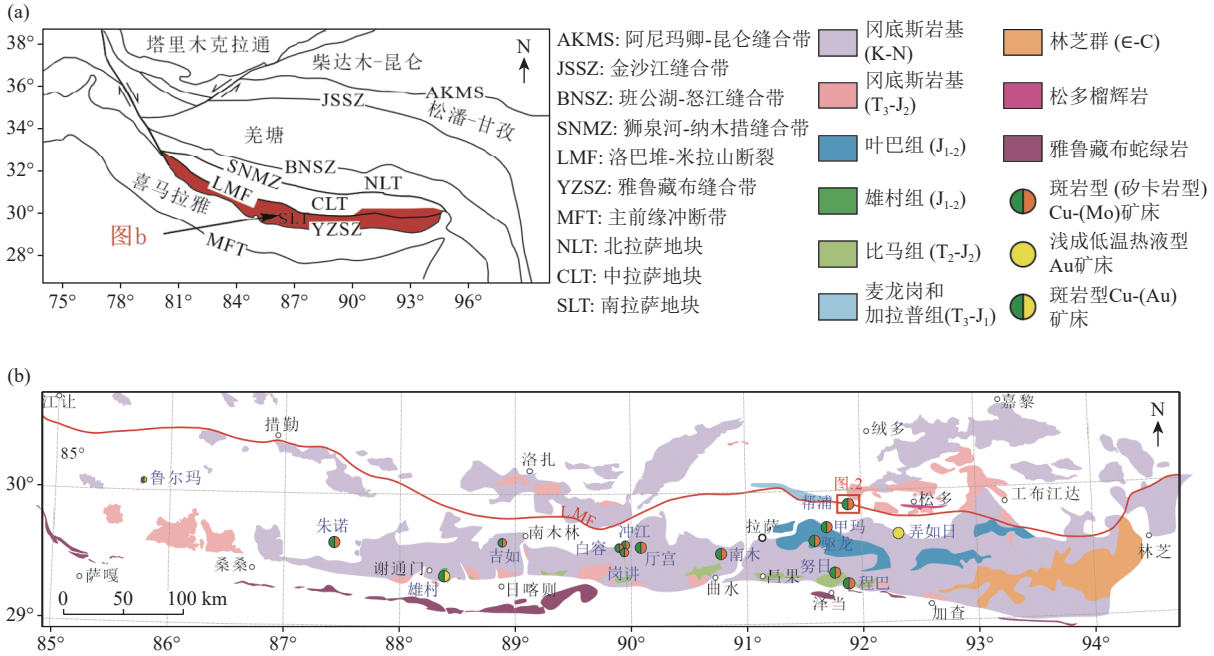


图 1　青藏高原大地构造简图(a 据文献 [6、7] 修改)、**冈底斯成矿带地质及矿床类型分布示意**(b 据文献 [10] 修改)

Fig. 1　Tectonic map of Himalayan-Tibetan orogen (a, modified from references [6, 7])**, geological map of Gangdese schematic diagram of deposit type distribution** (b, modified from Reference [10])

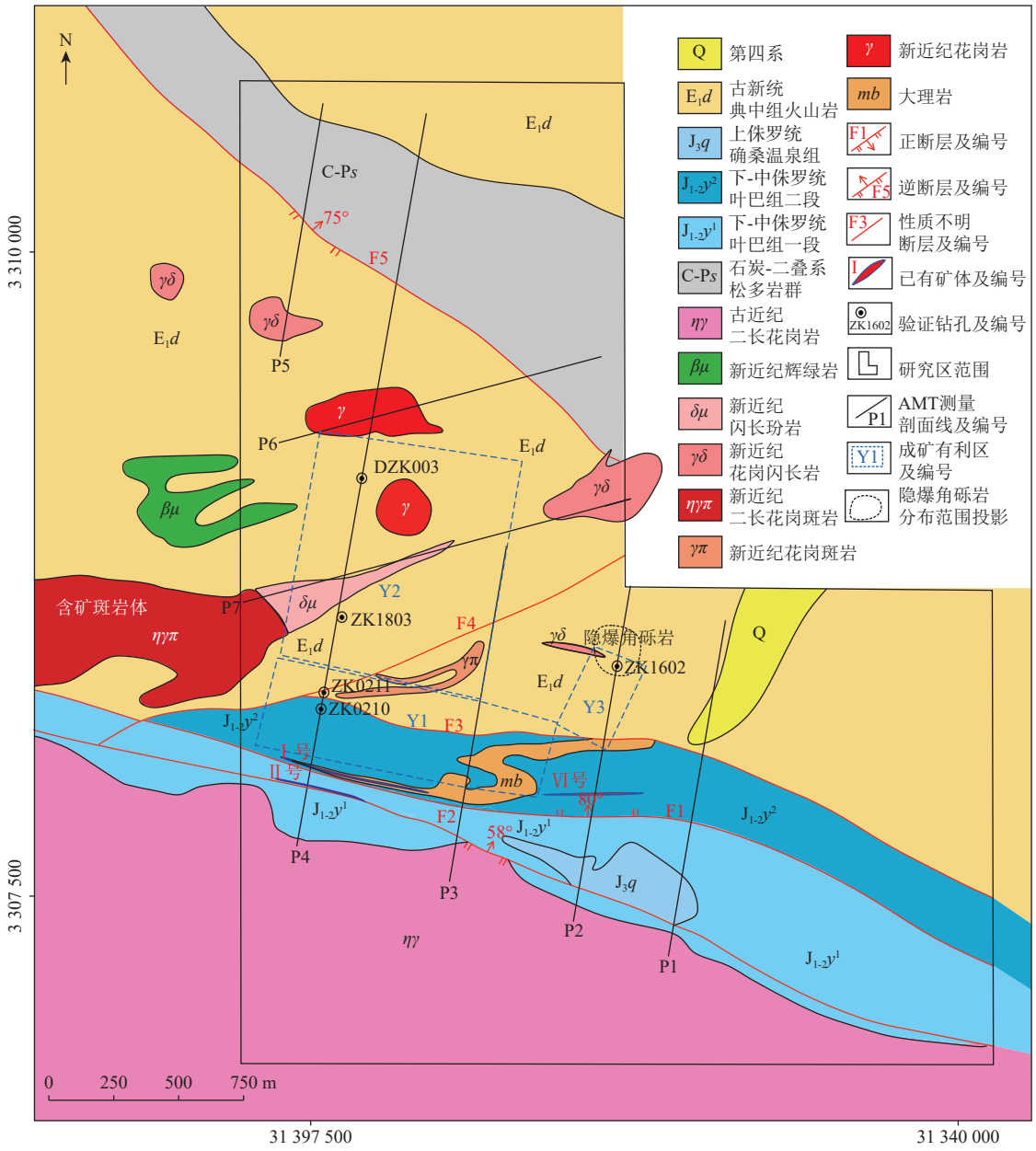


图 2　研究区地质简图

Fig. 2　Geological sketch map of study area

2　物性特征及物探工作方法

2.1　岩矿石物性特征

本次工作共采集物性标本 422 件，采样位置主要采集于研究区中部 11 号平硐及北部笛给地区新鲜基岩露头，测试前将标本浸水 24 h 后取出、晾干后分别对样品进行密度、磁性及电性参数进行了统计(表 1)，具体如下。

2.1.1 电性特征

1)矿石视电阻率一般在 500 Ω·m 以下，大理岩、火山岩、凝灰岩以及黑云母二长花岗岩等围岩视电阻率一般在 1 600 Ω·m 以上，矿石具有低电阻特征。

2)南部叶巴组一段地层中的碳质板岩夹层具有中—低电阻特征。

3)不含矿的隐爆角砾岩具有明显的中—高电阻，含矿隐爆角砾岩则表现为低电阻特征。

2.1.2 密度特征

区内岩矿石密度差异明显，矿石密度明显高于围岩。侵入岩(脉)类从基性至酸性，密度明显降低，与成矿关系较为密切的石英斑岩、闪长玢岩，其密度在 2.60 g/cm^3 左右。围岩除片岩和炭质板岩密度小于 2.70 g/cm^3 以外，其他岩石密度均在 2.75 g/cm^3 左右，而铅锌矿密度最大，达到 3.77 g/cm^3。

2.1.3 磁性特征

研究区内的黑云母二长花岗岩、二长花岗斑

表 1　岩 (矿) 石物性参数统计

Table 1　Statistical of petrophysical parameters for rock (ore) specimens

序号	岩矿石名称	块数n	视电阻率ρ_s/(Ω·m)		密度ρ/(g·cm^{-3})		磁化率k/(10^{-3}SI)	
			变化范围	均值	变化范围	均值	变化范围	均值
1	铅锌铜矿石	32	58~1 123	448	2.91~4.91	3.77	0.065~32.7	1.75
2	辉绿岩	32	3 656~4 754	4 351	2.59~3.24	2.92	0.98~9.94	5.74
3	闪长玢岩	34	1 674~2 564	2037	2.54~2.73	2.64	0.12~0.94	0.46
4	(二长)花岗斑岩	31	617~3 541	1 032	2.41~2.77	2.60	2.97~11.25	6.53
5	黑云母二长花岗岩	30	1 450~7 100	4 800	2.35~2.69	2.54	2.1~10.3	6.17
6	安山岩	30	3 690~6 027	5 023	2.70~2.95	2.83	0.019~0.395	0.15
7	凝灰岩	33	3 078~6 700	5 821	2.66~2.99	2.82	0.092~0.693	0.28
8	凝灰质板岩	40	278~4 936	2 201	2.64~2.89	2.74	0.22~2.18	0.58
9	火山角砾岩	33	1 206~7 366	3 706	2.56~2.91	2.70	0.034~0.128	0.08
10	大理岩	37	2 347~6 186	4 578	2.14~3.01	2.70	0.012~0.059	0.02
11	隐爆角砾岩	30	1848~3 374	2 177	2.50~2.84	2.67	0.021~0.119	0.07
12	片岩	30	2 543~4 367	3 165	2.42~2.79	2.59	0.031~0.135	0.07
13	碳质板岩	30	790~3 000	1 667	2.46~2.71	2.58	0.16~1.41	0.23

岩、辉绿岩及辉长岩以及铅锌矿石具有弱磁性, 其他岩石不具磁性。而矽卡岩、岩枝周边均不同程度发育磁铁矿、磁黄铁矿化, 磁性强。

总体来说, 区内铅锌矿石具有低电阻、高密度、弱磁性特征; 二长花岗斑岩、闪长玢岩、石英斑岩等岩体具有中—低阻、中—低密度, 磁性不一特征, 与其他岩石物性参数具有明显差异。矽卡岩型矿体赋存于大理岩和凝灰岩界面或者小岩枝(脉)周边, 矿带界面两侧密度差别较大, 加上磁铁矿、磁黄铁矿的存在使得矿体具有高密度、高磁化率、低阻的特征。浅成低温热液型矿体物性特征与矽卡岩型矿体物性特征相似, 但其不具备高磁化率特征, 总体呈现出高密度、中等磁化率、低阻的特征。由此可见, 研究区内地层的物性特征与含矿层、岩体之间存在明显的差别, 通过重力、磁法及 AMT 电法测量等多手段, 可以圈定出深部隐伏岩体(脉)和矿体的分布范围, 为寻找深部盲矿体提供指导。

2.2　工作方法及数据处理

2.2.1　重力测量

重力测量采用加拿大 Scintrex 仪器公司所生产的 CG-5 型重力仪, 能适应高海拔及高寒环境, 考虑到区内主要地层和构造主要为 EW 向, 本次测量 SN 向布置, 测量网度 100 m×20 m, 测量面积 8.56 km^2。野外数据采集完成后, 按照规范进行固体潮、零漂、正常重力值、布格改正及地形改正, 其中地形改正按近区(0~20 m)、中区(20~500 m)、远区(500 m~166.7 km)分别完成, 经各项改正后获得布格重力数据, 总精度达±0.030×10^{-5} m/s^2。数据处理采用 RGIS 2011 软件进行了场源分离、垂向二阶导数计算, 水平梯度模计算等处理。场源分离采用切割场法, 通过对比 300 m、500 m 及 800 m 滑动窗口半径的处理效果, 确定 500 m 窗口半径提取的剩余重力异常与已知岩体及隐伏岩体的空间相关性最佳, 最终以该成果作为研究区剩余重力异常。布格重力(Δg)数据以 20 m 网格间距进行网格化, 生成 GRD 文件。

2.2.2　高精度磁法测量

高精度磁法测量采用加拿大 GEM 公司研发的 GSM-19T 型质子磁力仪, 工作前后均进行了仪器检查和校正。测量前, 人员进行去磁工作, 测量时探头高度为 2.0 m, 全区基本测量点 4 721 个, 检查点 320 个, 检查比例 6.78%。磁测原始观测数据进行统一的日变改正、正常梯度改正、高度改正后获得 ΔT 数据, 总精度达 ±2.3 nT。ΔT 数据处理采用 GeoIPAS V4.6 软件, 主要进行了场源分离、垂向二阶导数计算、水平梯度模计算、解析信号等处理[18-19]。

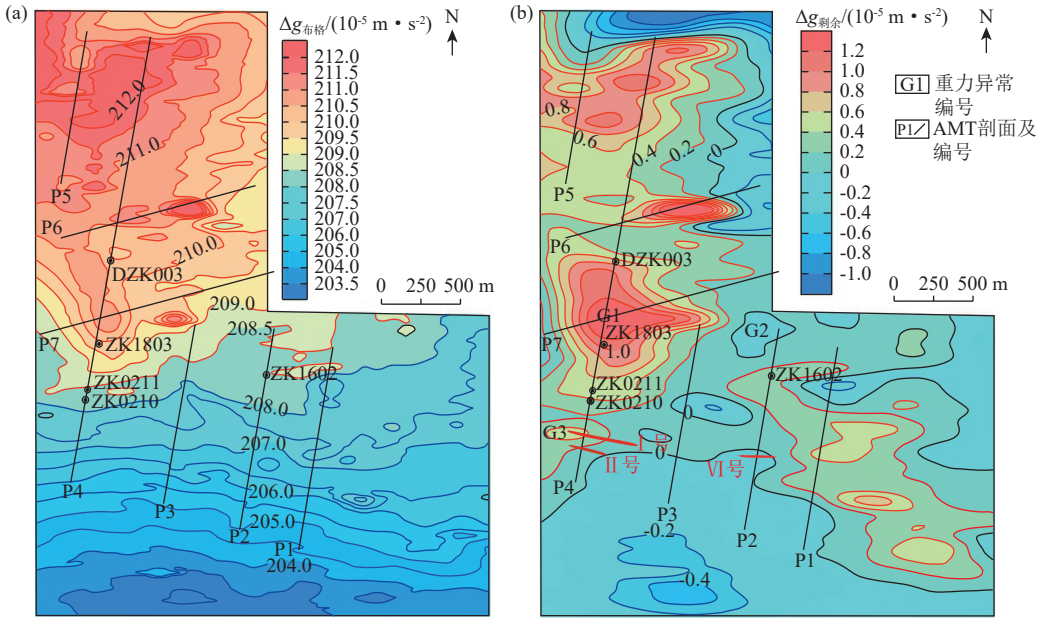
2.2.3　音频大地电磁测量

音频大地电磁测量(audio-frequency magnetotelluric sounding, AMT)采用了加拿大凤凰公司生产的 V8 多功能电磁观测系统, 观测频率范围是 1 Hz~10 kHz。AMT 剖面是根据重磁测量结果进行布设, 共布设剖面 7 条(图 2), P1~P5 号剖面方向与勘查线方向一致、P6 和 P7 剖面与勘查线方向近于垂直, 剖面点距 40 m, 局部重点地段加密至 20 m, 7 条剖面测点共计 350 点, 检查点 12 点。野外数据采集方式为张量测量, 接地电阻均在规范要求的 2 kΩ 以内, 数据处理采用商用 SCS2D 软件, 主要进行了剔除坏频点、利用曲线平移法进行静态校正, TE+TM 二维联合反演, 获取模型电阻率。

3　研究区物探异常特征

3.1　重力异常特征

区内布格重力整体呈“南低北高”的格局，空间差异显著。南部等值线近平行展布，低重力异常集中、中部梯度平缓，Δg 自南向北缓慢递增，密度相对均一；北部等值线圈闭、扭曲、梯变带密集，并叠加多个局部异常，构造—岩性边界特征突出（图 3a）。从剩余重力异常图 3b 可知，区内异常分带明显，结合区内岩矿石物性特征，推测北部高重力异常是由深部基性岩体引起，南部低重力异常则由地表的黑云二长花岗岩引起，而中部异常可能与隐伏岩体或矿化有关，本次选取 G1、G2 和 G3 这 3 个重力异常进行解释。



a—布格重力异常平面等值线;b—剩余重力异常平面等值线

a—bouguer gravity anomaly contour;b—residual gravity anomaly contour

图 3　重力测量成果简图

Fig. 3　Sketch map of gravity survey results

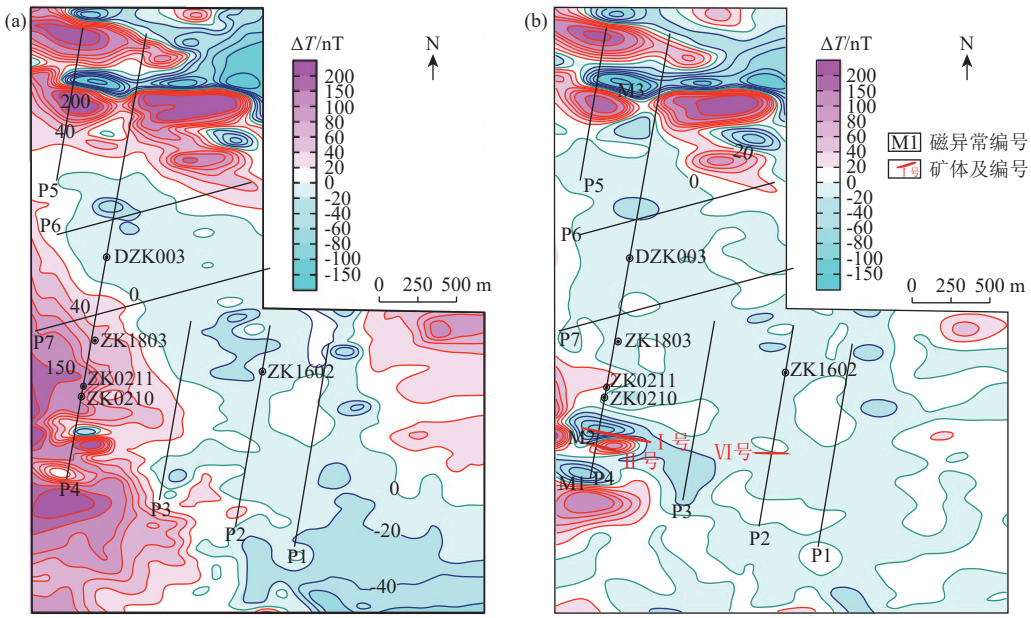
G1 异常：位于研究区中部，为高重力异常（强度 1.2×10^{-5} m/s^2，极大值 1.4×10^{-5} m/s^2），以 0.4×10^{-5} m/s^2 等值线圈定，呈不规则弧形展布（弧长 1 480 m，宽 410 m），西侧未封闭。异常区内出露地层岩性以片理化火山岩、闪长玢岩、凝灰岩、花岗斑岩为主，岩石蚀变发育，主要有角岩化、硅化、绢英岩化等，矿化则以黄铁矿化、铅锌矿化、黄铜矿化及孔雀石化为主。本异常范围较大，周边虽也有铅锌矿化发育，但不足以引起大面积的重力异常，推测为深部中基性岩体引起。

G2 异常：分布于研究区北东角附近，低重力异常（强度 -0.5×10^{-5} m/s^2），以 -0.5×10^{-5} m/s^2 等值线圈闭，异常区呈不规则椭圆状（长轴 540 m，短轴 230 m）。该区域地表覆盖较厚，出露古近系典中组中密度火山岩，以往钻孔和坑道显示该区域隐爆角砾岩呈筒状分布，角砾成分除凝灰岩、蚀变火山岩外，还可见大量的石英斑岩，推断该低重异常为深部石英斑岩体引起。

G3 异常：分布于Ⅰ、Ⅱ号铅锌矿体附近，中—高重力异常（强度 0.6×10^{-5} m/s^2），异常椭圆长轴近 EW 向分布，与 F1 近于平行，向西延伸出研究区。异常区范围与铅锌矿体赋存位置吻合度高，推测为铅锌矿体引起的局部重力异常。

3.2　磁场异常特征

区内 ΔT 异常呈“高—低—高”带状展布（图 4a），西南、北东两端为高值区、东南缘形态残缺，峰值尚未完全揭露、北东部发育近 EW 向，串珠状异常带、西南部高值区局部异常叠加明显。ΔT 局部异常（图 4b）则分布于南西部（M1、M2 异常）以及北部（M3 异常）。M1 异常位于 F2 断层南侧，呈正负伴生产出，南正北负，东西长 560 m，南北宽 430 m，异常强度 100 nT，该异常地表为二长花岗岩体，深部可能为叶巴组一段炭质板岩、火山角砾岩，该异常强度和规模均较大，推测为碳质板岩的存在隔离了深部磁



a—Δ*T* 异常平面等值线; b—Δ*T* 局部异常平面等值线

a—total-field magnetic anomaly (Δ*T*) contour; b—residual magnetic anomaly (Δ*T*) contour

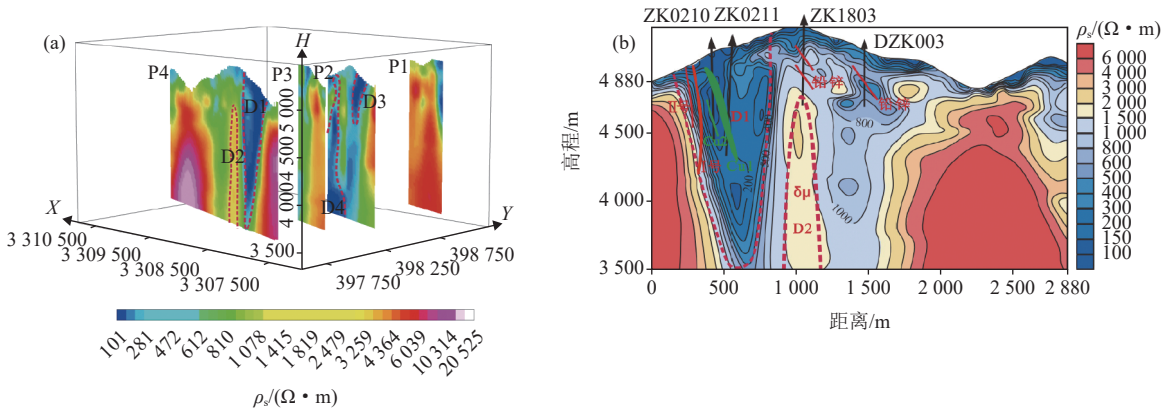
图 4　高精度磁法测量异常平面

Fig. 4　The plane anomaly map of high-precision magnetic survey

性物往上部运移而汇集成矿。M2 异常位于 M1 异常北部, 呈正负伴生产出, 南正北负, 东西长 330 m, 南北宽 290 m, 异常强度 80 nT, 地表出露下中侏罗统叶巴组二段地层, 具体位置为Ⅰ、Ⅱ号矿体之间, 推断异常是由矿体内磁黄铁矿、磁铁矿矿化引起。北部的 M3 号强磁异常区对应剩余重力异常中的高重力异常, 具备了高重力、强磁综合异常特征, 且异常与 F5 走向吻合度较高, 推测该异常为 F5 断层及深部中基性岩体引起。

3.3　AMT 异常特征

以往开展的大功率激电中梯测量和激电测深测量在寻找区内 300 m 以浅的隐伏铅锌矿体取得了一定成效[20-21], 但深部探测效果不佳。AMT 测量受浅部采空区、地层及构造等影响较小, 即使在高海拔的西藏地区, 其探测有效深度也可达 1 000 m 以上[22]。根据 AMT 测量成果, 区内深部地质体电阻率差异明显, 矿体和蚀变带呈低阻, 围岩及岩体呈高电阻。从 P1~P4 联合剖面来看(图 5a), P4 剖面 D1 低阻异常区(异常强度 80 Ω·m), 其地表出露叶巴组二段凝灰岩、火山岩, 局部黄铁矿化发育, 该异常电阻率极低, 异常向北陡倾, 异常区除已知Ⅰ、Ⅱ号铅锌矿体分布范围外, 其北部尚有较大范围的低阻区, 推测区内还有热液型金属硫化物矿体(图 5b)。D2 中—低阻异常区(异常强度 800~2 000 Ω·m), 地表出露岩性以凝



a—P1~P4 联合剖面; b—P4 剖面异常分布及验证情况

a—P1~P4 combined profiles; b—P4 profile anomaly distribution and verification status

图 5　AMT 测量剖面成果

Fig. 5　AMT measurement profile results

灰岩、流纹岩为主,仅有少量闪长玢岩,岩石蚀变强,褐铁矿化发育。电阻率显示浅部为低电阻,深部为中高电阻,推测深部可能为中性岩体。P2号剖面D3和D4低电阻区与PD11坑道内Ⅵ号铅锌矿体和隐爆角砾岩区吻合,为矿致异常。P1和P3剖面未见明显低电阻区,推测矿体沿走向连续性一般,可能存在"尖灭再现"的情况。

4　综合物探异常验证及找矿成果

4.1　综合物探异常及找矿预测

通过对重力、磁法及AMT测量成果的综合研究,发现G3中—高重力异常、M2磁法异常和D1低电阻异常区范围高度重合,结合矿区地质特征,认为P4剖面处Ⅰ、Ⅱ号矿体深部矽卡岩发育,矿体往深部延伸较好。在D1低电阻异常区中部,重力异常与M2磁异常区域基本相同,磁异常出现正负异常转换,同时F3断层的存在为成矿提供了成矿运移通道和储矿空间,结合已有勘探资料认为该区域找矿前景较好,为铅锌铜多金属矿重点找矿靶区(Y1),可进行钻孔验证。该区域北部G1高重力区叠合D2中—高电阻异常区,推测该异常组合为深部中基性岩体引起,从地表至推测岩体,电阻率逐渐增加,研究区内岩体周边多分布角岩型、矽卡岩型铅锌矿体,该区域(Y2)可重点寻找矽卡岩、角岩型铅锌矿。G2低重力异常区虽无磁异常,但叠加了隐爆角砾岩的低电阻异常(D4),推测深部周边可能存在隐伏的含矿斑岩体,该区(Y3)重点寻找隐伏斑岩型铜矿。研究区北部的高重力叠加大规模的高磁异常推测为由隐伏辉绿岩等基性岩体引起的,可少量工程验证。而其他单异常,尤其是低电阻率异常往往是金属硫化物矿体所致,如D3低阻异常即为Ⅵ号铅锌矿体引起,该类异常对寻找小规模矿体指示意义较强。

4.2　找矿成果

根据研究区物探异常特征结合斑岩型成矿模型[23],优先在Y1~Y3这3个成矿有利区布设了5个钻孔。在P4线480 m、540 m分别施工ZK0210和ZK0211两个钻孔对南部综合异常进行验证(图5b)。钻孔成果显示,ZK0210在205.6 m、289.4~381.5 m以及435.2~452.8 m处,和ZK0211在608.8 m、705.2~752.3 m处均发现大范围的黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿以及磁黄铁矿化。其中ZK0210矿化带中的黄铜矿化连续分布超50 m,Cu平均品位0.78%,实现了研究区铜矿找矿重大突破。G1高重力区叠合D2中—高电阻异常区布设ZK1803钻孔,浅部为强蚀变、黄铁矿化凝灰岩、安山岩等,钻孔在114.1~151.6 m、313.4~328.6 m揭露出强蚀变岩层并发育铅锌矿,358.6~416 m处揭露出闪长玢岩体,验证了深部G1高重力异常。在G2低重力异常中部,布设的ZK1602钻孔,揭露出隐爆角砾岩,预计750~800 m见隐伏岩体顶部,但仅见一层厚26 m的石英斑岩脉,未能揭露到深部隐伏岩体,推测研究区为侧向隐爆模式,而不是底倾隐爆。此外,在P4线1 480 m处布设的DZK003用以验证其深部的低阻异常(无明显重力和磁异常),在钻孔652.3~664.5 m处的断层破碎带,发现一层铅锌(化)矿体,也证明了AMT单异常在区内寻找热液脉型硫化物矿体的有效性。

5　结论

1)研究区位于帮浦斑岩型钼铜矿外围,是寻找矽卡岩型、浅成低温热液型矿体的有利区域。1∶1万重力测量通过密度差异查明了区内隐伏岩体及角岩矽卡岩的分布范围,高精度磁法工作利用磁异常进一步缩小矽卡岩分布区域,大地音频电磁测量电阻率差异查明地下电性体空间分布特征,同时结合以往地质工作成果,可进一步确定隐伏岩体、岩体接触带以及矿体可能分布位置,为工程布置提供可靠的依据。

2)隐爆角砾岩中心区域钻孔内暂未发现规模的隐伏岩体,但已有勘查成果中矽卡岩分布特征显示深部更靠近岩体,推测隐伏岩体应位于ZK1602南西侧,研究区内隐爆角砾岩为南西向的侧向隐爆模式,下阶段工作可针对大理岩深部布置钻头进行验证,力争寻找到区内第二热源中心,实现找矿突破。

致谢:本文在撰写过程中得到了中国自然资源航空物探遥感中心周道卿正高级工程师的认真指导,在此表示感谢!

参考文献(References):

[1] 郑有业,吴松,次琼,等. 冈底斯复合造山带铜钼金多金属成矿作用与成矿系列[J]. 地球科学,2021,46(6):1909-1940.
Zheng Y Y, Wu S, Ci Q, et al. Cu-Mo-Au metallogenesis and minerogenetic series during superimposed orogenesis process in Gangdese[J]. Earth Science, 2021, 46(6): 1909-1940.

[2] Zuo J Z, Xie G Q, Chang Z S, et al. Geology and geochronology of the Bangpu porphyry-skarn-epithermal Mo-Cu-Zn-Pb-Ag deposit in the Gangdese metallogenic belt, Tibet[J]. Mineralium Deposita, 2025, 61(7): 1−23.

[3] 胡永斌,刘吉强,胡敬仁,等. 西藏帮浦钼铜多金属矿床含矿斑岩

的地球化学: 对成岩源区与成矿机制的启示 [J]. 岩石学报, 2015, 31(7): 2038−2052.
Hu Y B, Liu J Q, Hu J R, et al. Geochemical studies on ore-bearing rocks in Bangpu porphyry Mo (Cu) deposit, Tibet: Implications on the magma source and metallogenic mechanism[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(7): 2038−2052.

[4] 段瑞锋, 袁炳强, 冯旭亮, 等. 基于重、磁、电资料的陕西山阳池沟矿区找矿预测 [J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1196-1207.
Duan R F, Yuan B Q, Feng X L, et al. Prospecting prediction of Chigou mining area in Shanyang, Shaanxi Province based on gravity, magnetic and electric data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1196-1207.

[5] 游越新, 邓居智, 陈辉, 等. 综合物探方法在云南澜沧老厂多金属矿区深部找矿中的应用 [J]. 物探与化探, 2023, 47(3): 638-647.
You Y X, Deng J Z, Chen H, et al. Application of integrated geophysical methods in deep ore prospecting of Laochang polymetallic mining area in Lancang, Yunnan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(3): 638-647.

[6] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211−280.

[7] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 301(1-2): 241−255.

[8] 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息 [J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 281−290.
Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, et al. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(3): 281−290.

[9] 潘桂棠, 肖庆辉, 陆松年, 等. 中国大地构造单元划分 [J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1−28.
Pan G T, Xiao Q H, Lu S N, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1−28.

[10] Wang X H, Lang X H, Deng Y L, et al. Early Mesozoic magmatism records the tectonic evolution from syn-to post-collisional setting in the Central Lhasa subterrane, Tibet[J]. Lithos, 2022, 416-417: 106642.

[11] 赵晓燕, 杨竹森, 张雄, 等. 西藏帮浦斑岩矿床黑云二长花岗岩的形成时代及地球化学特征 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2017, 36(5): 786−796.
Zhao X Y, Yang Z S, Zhang X, et al. Geochronology and geochemistry characteristics of the Biotite Monzonite in the Bangpu Porphyry deposit, Tibet[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(5): 786−796.

[12] 周雄. 西藏帮浦钼铜多金属矿床成因研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
Zhou X. Genisis study of Mo-Cu polymetallic deposit from the Bangpu, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.

[13] 王立强. 西藏帮浦式钼多金属矿床-兼论冈底斯成矿带东段钼多金属矿床成矿规律 [D] 北京: 中国地质科学院,2013.
Wang L Q. Study on Bangpu-type molybdenum polymetallic deposit, Tibet and the metallogenic regularity of molybdenum polymetallic deposits in the east section of the Gangdese Metllogenic Belt[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences,2013

[14] Luo M C, Tang J X, Mao J W, et al. Immiscibility of magmatic fluids and their relation to Mo and Cu mineralization at the Bangpu porphyry deposit, Tibet, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 103(5): 360−373.

[15] 赵晓燕. 西藏帮浦斑岩—矽卡岩钼铜铅锌矿床地质特征及矿床成因 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Zhao X Y. Geology and genesis of the post-collisional porphyry skarn Mo-Cu-Pb-Zn deposit at Bangpu, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing),2015.

[16] 冷秋锋, 王立强, 应立娟, 等. 西藏帮浦钼(铜)矿床辉绿玢岩脉体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地球学报, 2012, 33(4): 559−568.
Leng Q F, Wang L Q, Ying L J, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of allgovite in the Bangpu Molybdenum (Copper) deposit in Tibet and its geological significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(4): 559−568.

[17] 赵晓燕, 杨竹森, 侯增谦, 等. 西藏帮浦矿区辉绿玢岩成因及对区域构造岩浆演化的指示 [J]. 岩石学报, 2013, 29(11): 3767−3778.
Zhao X Y, Yang Z S, Hou Z Q, et al. Petrogenesis of diabase porphyrite in Bangpu deposit of Tibet and its instructions to the regional tectonic and magmatie evolution[J]. [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(11): 3767−3778.

[18] 郭国强, 李亚东, 王阳, 等. 鲁西北潘店重磁异常带矽卡岩型铁矿精细找矿方向—来自广域电磁法深部找矿的启示 [J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 327-333.
Guo G Q, Li Y D, Wang Y, et al. Fine-scale prospecting targets of skarn iron deposits in the Pandian gravity-magnetic anomaly zone of northwestern Shandong Province: Insights from deep prospecting using the wide-field electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(2): 327-333.

[19] 何俊飞. 综合物探在新兴都斛铜矿床勘查中的应用 [J]. 物探与化探, 2024, 48(2): 375−381.
He J F. Application of comprehensive geophysical prospecting in exploration of the Duhu copper deposit in Xinxing County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(2): 375−381.

[20] 樊文鑫, 李光明, 梁生贤. 西藏扎西康铅锌多金属矿床控矿构造的电性特征及找矿预测 [J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2021, 51(6): 1709-1719.
Fan W X, Li G M, Liang S X.Electrical characteristics of ore-controlling structures and prospecting prediction of Zhaxikang mining area, Xizang[J]. Journal of Jilin University:Earth Science Edition, 2021, 51(6): 1709-1719.

[21] 陈小龙, 高坡, 程顺达, 等. 西藏帮浦东段—笛给铅锌矿区 CSAMT 异常特征与深部找矿预测 [J]. 物探与化探, 2021, 45(2): 361−368.
Chen X L, Gao P, Cheng S D, et al. A study of anomaly characteristics of CSAMT and deep prospecting prediction of the lead-zinc deposits in eastern BangpuDigei mining area of Tibet[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 361−368.

[22] 焦彦杰,张志,董磊. 三维电性资料揭示西藏扎西康矿床深部结构 [J]. 东华理工大学学报:自然科学版,2023,46(6):576-584.
Jiao Y J, Zhang Z, Dong L. Underlying structure of the Zhaxikang deposit in Xizang revealed by three-dimensional electrical data[J]. Journal of East China University of Technology:Natural Science Edition, 2023, 46(6): 576-584.
[23] Sillitoe R H. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 2010, 105(1): 3-41.

Application of integrated geophysical prospecting to deep mineral exploration in the Bangpu mining area, eastern Gangdese metallogenic belt

GAO Po[1], HU Jie[2,3], ZHANG Ye-Peng[4], DAI Xue-Ling[5], Dan-Ba-Yong-Zhong[3]

(1. *Xizang Jinhe Mining Co., Ltd., Lasa* 851400, *China*; 2. *College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059, *China*; 3. *Xizang No. 3 Geological Brigade Geology and Mineral Co., Ltd., Lasa* 851400, *China*; 4. *Geospatial Survey and Monitoring Institute of HuNan Province, Changsha* 410129, *China*; 5. *Hunan Mineral Resources Group, Changsha* 410129, *China*)

Abstract: The Bangpu mining area, located in the eastern Gangdese metallogenic belt, represents a typical porphyry-skarn deposit. Since skarn ore bodies occurring in shallow skarns at the periphery of porphyries have been largely exhausted, there is an urgent need to explore deep replacement resources. This study aims to further determine the spatial distribution of deep-seated concealed rock masses and their surrounding ore bodies in the study area. This effort will help achieve breakthroughs in mineral exploration. To this end, this study conducted 1:10000 gravity surveys, high-precision magnetic surveys, and audio-frequency magnetotelluric (AMT) surveys in the eastern part of the Bangpu mining area, followed by an analysis and summary of the causes of geophysical anomalies. The comprehensive geophysical prospecting results indicate that the high- and low-amplitude gravity anomaly zones in the central part of the study area correspond to intermediate-mafic and intermediate-acid concealed rock masses, respectively. Two magnetic anomalies identified in the southwest might be ore-induced anomalies caused by magnetite and pyrrhotite surrounding skarns. In combination with the AMT data, boreholes were drilled in low-resistivity zones at the edge of high-amplitude gravity anomalies, as well as zones with strong magnetism, moderate gravity, and low-amplitude resistivity anomalies, to explore the deep rock masses and their surrounding skarn-type ore bodies. Consequently, two copper belts (ore bodies) and two lead-zinc ore bodies were identified. The exploration results of this study demonstrate that high-precision gravity surveys, magnetic surveys, and AMT surveys perform well in exploring deep concealed ore bodies in the Bangpu mining area, Tibet. These methods constitute an effective technical combination for deep mineral exploration of similar deposits in the Gangdese metallogenic belt.

Key words: eastern Gangdese metallogenic belt; Bangpu deposit; gravity survey; high-precision magnetic survey; audio-frequency magnetotelluric(AMT) survey; porphyry-skarn deposit

(本文编辑:叶佩)