doi: 10.11720/wtyht.2026.1098
徐密, 段学斌, 郑小龙, 等. 时频电磁法与高精度磁测在深部隐伏矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 207-215. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1098
Xu M, Duan X B, Zheng X L, et al. Application of the time-frequency electromagnetic method and high-precision magnetic survey in the exploration of deep concealed ores[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 207-215. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1098

时频电磁法与高精度磁测在深部隐伏矿勘查中的应用

徐密, 段学斌, 郑小龙, 叶丽梅, 秦海琳, 李天, 杨懿, 滕润一
(云南黄金矿业集团股份有限公司, 云南 昆明 650200)

摘 要: 云南保山金厂河矿集区位于保山—镇康铅锌铜多金属成矿带的北部, 主要矿床类型为矽卡岩型铁铜铅锌多金属矿, 强磁异常是区内以往找矿的主要物探标志, 而弱磁异常并未被重视。本次对区内弱磁异常开展研究, 采用时频电磁法和高精度磁测技术组合, 对弱磁异常进行查证, 获取电、磁异常信息, 结合地质条件开展多参数联合约束反演, 圈定找矿靶区, 精细定位深部隐伏矿体的空间形态和赋存部位。探测结果经钻孔验证取得显著的找矿效果, 表明弱磁异常同样具有较好的找矿意义。该研究为矿集区今后深边部找矿提供了良好的范例, 对其他地区同类型矿床勘查也具有借鉴意义。

关键词: 矽卡岩; 时频电磁法; 高精度磁测
中图分类号: P631;P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)02-0207-09

0 引言

云南保山金厂河矿集区位于冈底斯—念青唐古拉褶皱系中南段, 福贡—镇康褶皱带, 保山—永德褶皱束北段之核桃坪复背斜东翼, 属保山 Pb-Zn-Ag-Fe-Au-Cu 成矿带[1-4], 是滇西地区重要的矿产资源基地。前人利用地面磁测在矿集区内圈定磁异常, 发现了金厂河、核桃坪大型铅锌铁多金属矿及黑岩凹、陡崖等中小型矿床近 10 处, 磁测在区内找矿工作中取得了极好的效果[5-6]。然而, 随着工作程度的加深, 矿集区内的强磁异常早已查证完毕, 加之区内矿体多为隐伏矿且埋深较大, 地表找矿信息弱, 因而近年来找矿工作陷入瓶颈期。

本次对矿集区内以往找矿工作中否定的小范围低缓磁异常进行再研究, 推断其可能是由深部隐伏矿引起, 具有较好的找矿潜力, 重新部署了地面高精度磁测和时频电磁法进行查证。高精度磁测是区内寻找矽卡岩型矿床的有效方法, 可大致圈定磁性体分布范围, 评价磁性体地质属性, 定量或半定量分析磁性体赋存部位[7-9]。时频电磁法 (TFEM) 是能源和矿产勘探领域中出现的一种新方法, 具有抗干扰能力强、勘探深度大、勘探精度高等优点, 能够同时提供电阻率和极化率两方面的信息, 有助于减少异常多解性, 显著提高解释精度, 降低钻孔验证风险[10-16]。本次研究通过高精度磁测和时频电磁法优选找矿靶区, 圈定深部隐伏矿体产出部位, 经钻孔验证, 揭露到厚大矽卡岩型铁多金属矿体, 取得了矿集区深部隐伏矿勘查的新突破, 为区内下一步找矿工作提供了良好的方法技术示范。

1 地质特征

研究区位于矿集区金厂河铅锌铁多金属矿与黑岩凹铁多金属矿的结合部(图 1), 出露地层主要有: 寒武系上统核桃坪组(ϵ_3h), 分 2 个岩性段, 一段(ϵ_3h^1)岩性以粉砂岩为主, 二段(ϵ_3h^2)以灰岩、钙质板岩为主; 寒武系上统沙河厂组($\epsilon_3\hat{s}h$), 分 3 个岩性段, 一段为细晶灰岩夹鲕状灰岩, 二段为泥质粉砂岩、钙质泥岩与泥质灰岩、砂屑灰岩不等厚互层, 三

收稿日期: 2025-03-31; **修回日期**: 2025-10-21
基金项目: 云南黄金矿业集团股份有限公司地质勘查项目(资源 202309)
第一作者: 徐密(1985-), 男, 高级工程师, 2008 年毕业于中南大学, 研究方向为金属矿物化探勘查。Email: 405457406@qq.com
通讯作者: 段学斌(1986-), 男, 正高级工程师, 2009 年毕业于中国地质大学(武汉), 研究方向为金属矿物化探勘查。Email: 273496196@qq.com

段为灰岩、大理岩化灰岩、大理岩；奥陶系中—上统蒲缥组 (O*p*)，岩性为粉砂岩、泥岩夹泥灰岩；奥陶—志留系仁和桥组 (OS*r*)，岩性为页岩夹粉砂岩；志留系中—上统栗柴坝组 (S*l*)，岩性主要为泥质灰岩，夹钙质泥页岩及粉砂岩。其中核桃坪组二段和沙河厂组一段是区内矽卡岩型矿床的主要产出地层[17-19]。

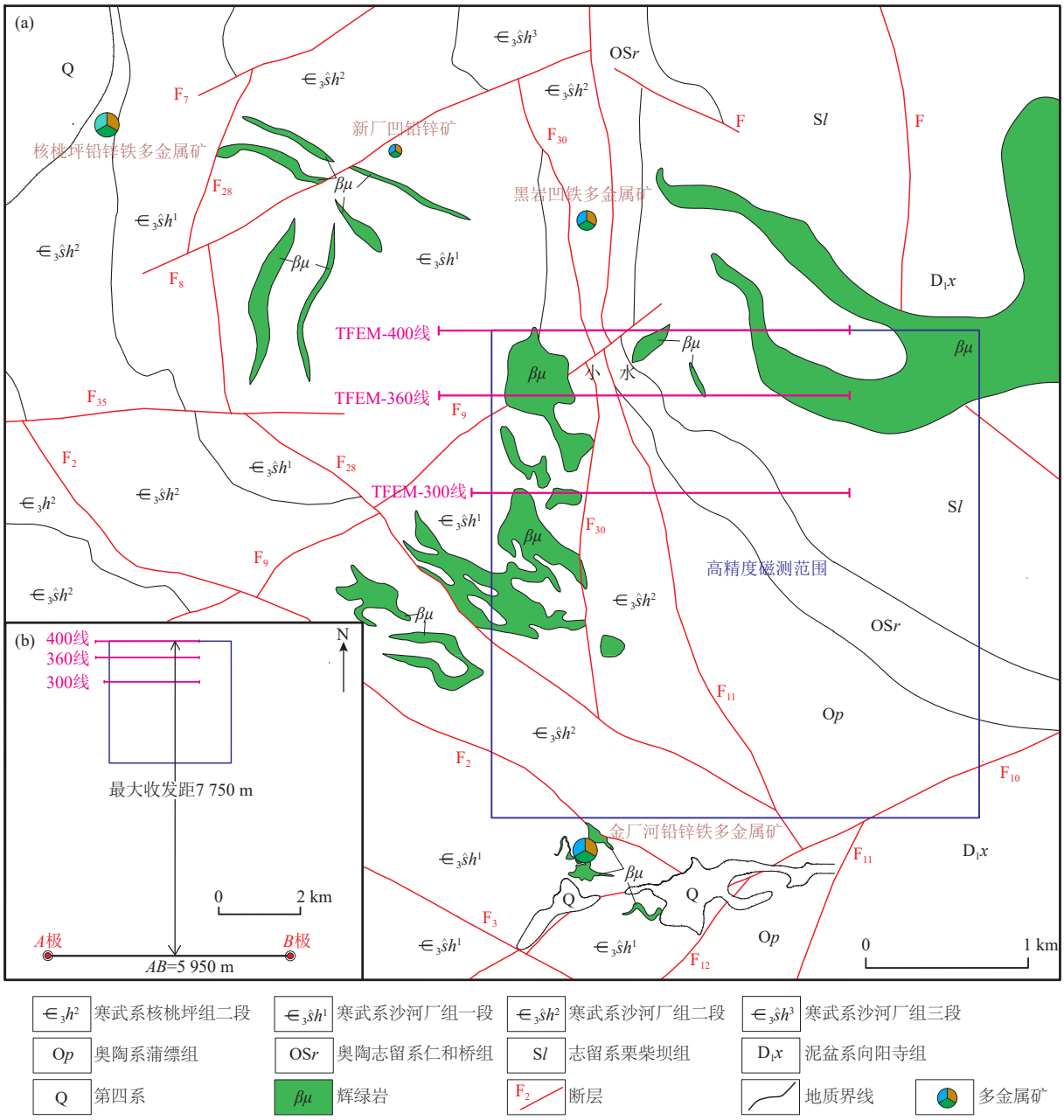


图 1　金厂河矿集区物探工作部署(a)及时频电磁法测量装置示意(b)

Fig. 1　Deployment of geophysical exploration work in Jinchanghe mining area (a) and schematic diagram of TFEM device (b)

矿集区断裂构造分为 NE 向、NW 向和 SN 向 3 组，其中 NE 向和 SN 向断裂为早期断裂，为区内的导矿构造或容矿构造，如 F_{11} 区域性控矿断层，黑岩凹铁多金属矿即产出于该断层下盘，与其关系紧密，该断层往南延伸至本次研究区内；NW 向断层为后期断裂，属破矿构造。矿集区岩浆岩仅见印支期辉绿岩，呈脉状、透镜状沿断层、层间破碎带及构造裂隙产出，呈近 NE 向、SN 向展布，长一般几米至上百米[20-22]。

2　物性特征

2.1　极化率

对矿集区岩矿石标本的极化率进行测量，统计结果见表 1。矽卡岩型多金属矿体极化率均值均大于 7%，具有明显的高极化特征；奥陶—志留系仁和

表 1　金厂河矿集区主要岩性极化率特征

Table 1　Main rock polarization characteristics of Jinchanghe mining area

地质体及主要岩性	标本数	极化率η/%		
		最小值	最大值	算术平均值
矽卡岩型铅锌矿	27	3.74	18.51	7.72
矽卡岩型磁铁矿	98	3.91	51.32	7.52
矽卡岩型铜矿	30	0.72	15.54	7.27
炭质泥岩	17	0.98	7.34	4.29
灰岩	35	0.65	6.75	3.11
无矿化矽卡岩	74	0.53	8.34	2.06
泥质灰岩、大理岩化灰岩	51	0.56	8.55	1.97
砂岩	32	0.40	2.85	1.60
辉绿岩	32	0.10	1.59	0.41

桥组炭质泥岩极化率次之, 均值大于 4%, 极化率也较高, 是区内高极化异常的主要干扰地质体; 砂岩、灰岩、无矿化矽卡岩极化率均值小于 3.5%, 难以引起高强度的极化率异常; 辉绿岩极化率均值为 0.41%, 为全区最低; 可见区内矽卡岩型矿体与围岩在极化率上差异显著, 极化率可作为识别矿体的有效参数。

2.2　电阻率

由矿集区主要岩性电阻率统计结果(表 2)可见, 粉砂岩、泥岩等碎屑岩电阻率较低, 几何均值小于 3 000 Ω·m, 以这类岩性为主的地层一般具有低阻特征, 如奥陶—志留系仁和桥组、奥陶系蒲缥组。灰岩、大理岩电阻率较高, 几何均值在 10 000 Ω·m 左右, 以这类岩性为主的地层一般具有高阻或中高阻特征, 如寒武系沙河厂组二段和一段、核桃坪组二段。无矿化矽卡岩为中高阻特征, 辉绿岩为中阻特征。矽卡岩型多金属矿体电阻率小于 2 000 Ω·m, 具有明显的低阻特征, 其产出于寒武系沙河厂组一段和核桃坪组二段内, 与围岩电阻率差异很大。

表 2　金厂河矿集区主要岩性电阻率、磁化率特征

Table 2　Main rock resistivity and magnetic susceptibility of Jinchanghe mining area

地质单元	主要岩性	标本数	电阻率/(Ω·m)		磁化率/($4\pi\times10^{-6}$SI)	
			范围	几何均值	范围	几何均值
OSr	炭质泥岩	17	199～4 354	1 088	1.6～7.6	5.5
Op	粉砂岩、泥岩	35	214～7 585	1 745	0.8～15.9	9.2
O$\hat{s}$	粉砂岩、泥岩	36	296～6 945	1 146	0.8～19.9	7.2
$\epsilon_3\hat{s}h^2$	粉砂岩	29	609～2 803	1 146	0.8～15.1	9.2
	灰岩	19	3 648～43 887	13 593	0.8～2.4	1.2
$\epsilon_3\hat{s}h^1$	灰岩、泥灰岩	80	2 103～109 620	10 144	0.2～44.2	6.8
ϵ_3h^2	灰岩	41	1 358～65 898	10 038	0.1～43	3.9
	钙质板岩	32	1 085～38 625	8 896	0.1～69.2	16.6
ϵ_3h^1	粉砂岩、泥岩	37	133～14 248	1 035	4～24.7	14.2
sk	无矿化矽卡岩	104	48～77 968	7 526	7.2～469.5	135.1
$\beta\mu$	辉绿岩	68	323～40 884	3 820	9.3～50.9	27
矿体	矽卡岩型铜铅锌矿	57	4～139 932	1951	2 554～127 717	31 538
	矽卡岩型磁铁矿	98	6.8～134 333	814	3 624～381 422	20 515

2.3　磁化率

矿集区内的矽卡岩型多金属矿磁化率可达 20 000 ($4\pi\times10^{-6}$ SI)以上, 具有显著的高磁特征; 无矿化的矽卡岩磁化率小于 200($4\pi\times10^{-6}$ SI), 具弱磁性; 辉绿岩磁化率较小, 假设其出露地表且剩磁与感磁强度相当, 采用式(1)可估算其引起的磁异常在±50 nT 以内, 这一估算结果与区内磁测井成果吻合。

$$\Delta T = 2\pi\left(K\cdot T_0 + J_r\right), \qquad (1)$$

式中: K 为磁化率, $4\pi\times10^{-6}$ SI; J_r 为剩余磁化强度, 10^{-3} A/m; T_0 为地磁场总强度, 为 0.57 Oe; 其余岩类磁化率很小, 磁性微弱。

由上述物性成果可见, 矿集区内的矽卡岩型多金属矿具有低阻高极化、高磁特征, 其综合物性与围岩有着显著差异, 具备开展时频电磁法和地面高精度磁测的地球物理前提。

3　物探异常特征

3.1　磁异常

矿集区内小水磁异常位于金厂河与黑岩凹两个强磁异常之间, 1∶5 万垂直磁测成果(图 2)显示其为一面状低缓正磁异常, 异常东西长约 2 km, 南北宽约 1 km, 强度约 150 nT。经 1∶10 000 垂直磁测查证, 异常面积约 1.2 km^2, 只有正磁异常, ΔZ 强度约 100 nT。该异常经 ZK0-1、ZK11-1 两个钻孔验证, 未揭露到磁性体, 前人结合当时的物性资料认为该异常主要由辉绿岩引起, 找矿意义不大。但从前文物性资料来看, 辉绿岩难以引起如此强度的磁异常, 其

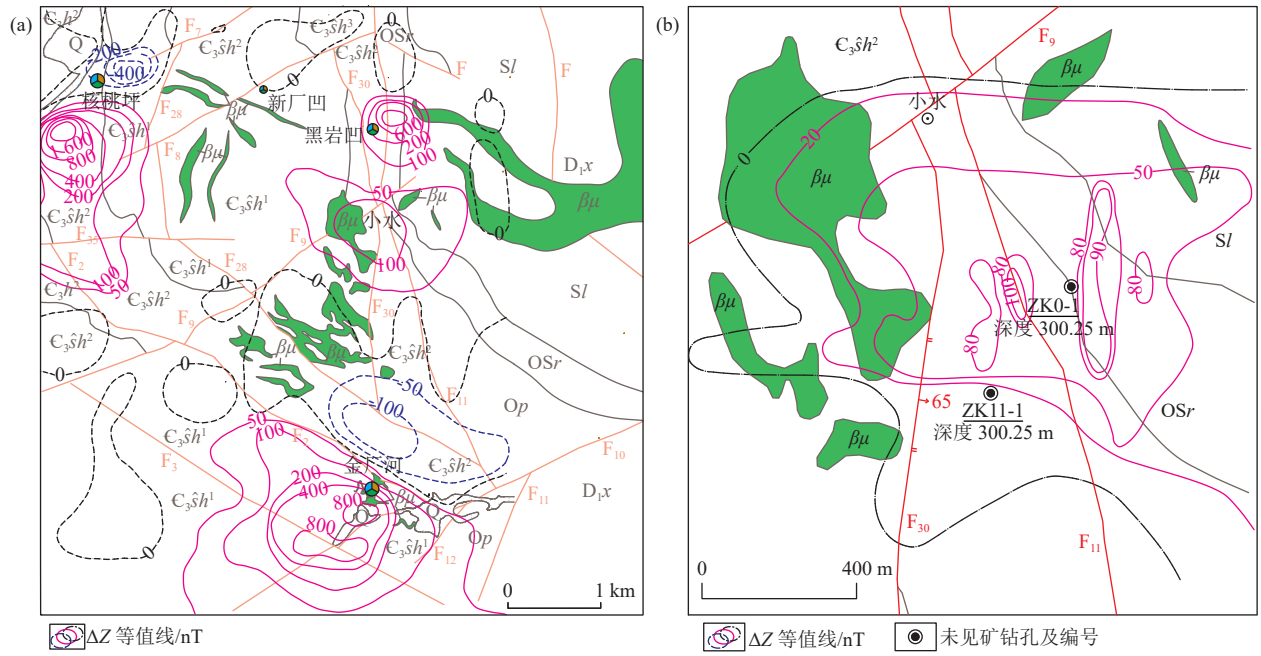


图 2　矿集区 1∶5 万垂直磁测 Δ*Z* 等值线(a)与 1∶10 000 垂直磁测 Δ*Z* 等值线(b)

Fig. 2　1∶50 000 vertical magnetic survey Δ*Z* contour map (a) and 1:10 000 vertical magnetic survey Δ*Z* contour map (b) of the mining area

与磁异常在空间上并无明显对应关系，因此这一结论值得商榷。

本次 1∶10 000 高精度磁测成果(图 3)反映，小水异常中Δ*T* 以正磁异常为主，呈面状，长约 1 700 m，宽约 1 100 m，面积约 1.5 km^2，极大值为 141.91 nT。从异常形态来看，该异常具有明显的深源异常特征，而异常区内出露的地层及辉绿岩磁性均很弱，因此推断其由具有较大埋深的强磁性地质体所引起。Δ*T* 经化极处理，磁异常向北偏移，面积减小，约为 0.5 km^2，异常主体分布在 F_{30} 断层以东，南西侧梯度带较陡，北东侧平缓，反映磁性体应向东或北东倾伏。在 F_{30}~F_{11} 断层之间夹持有近 SN 向的高值异常

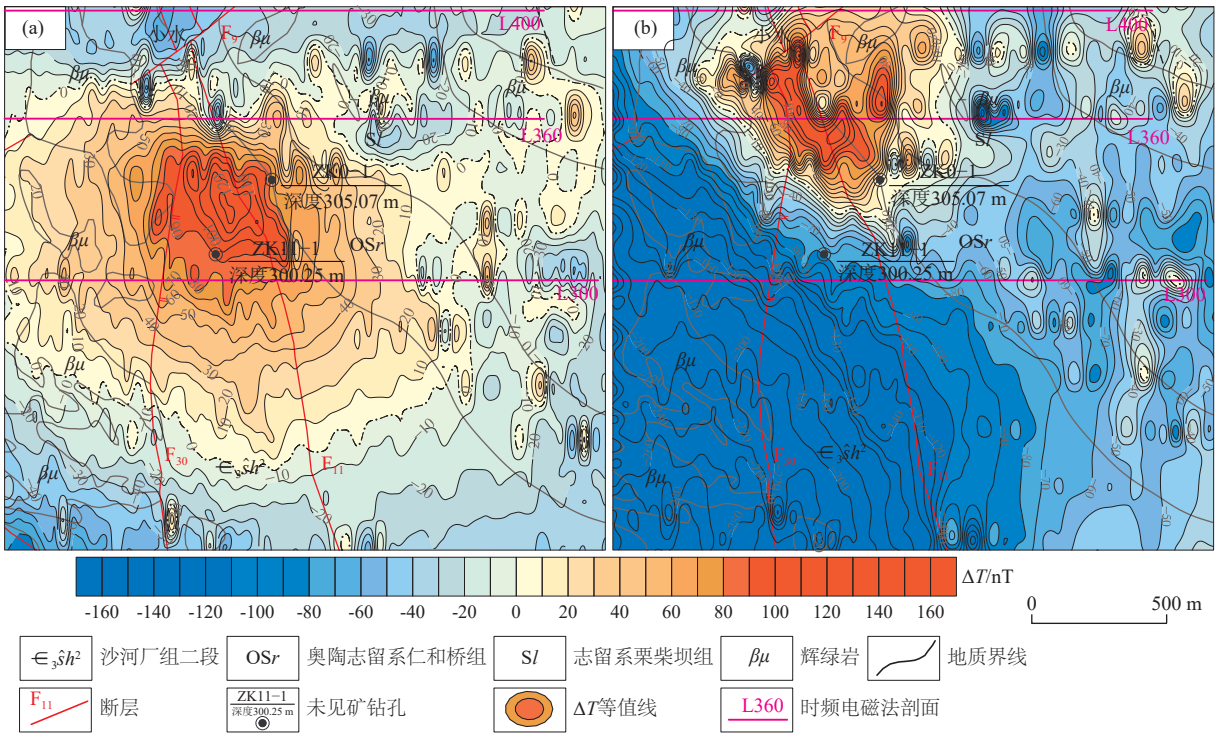


图 3　1∶10 000 高精度磁测 Δ*T* 等值线(a)与 Δ*T* 化极等值线(b)

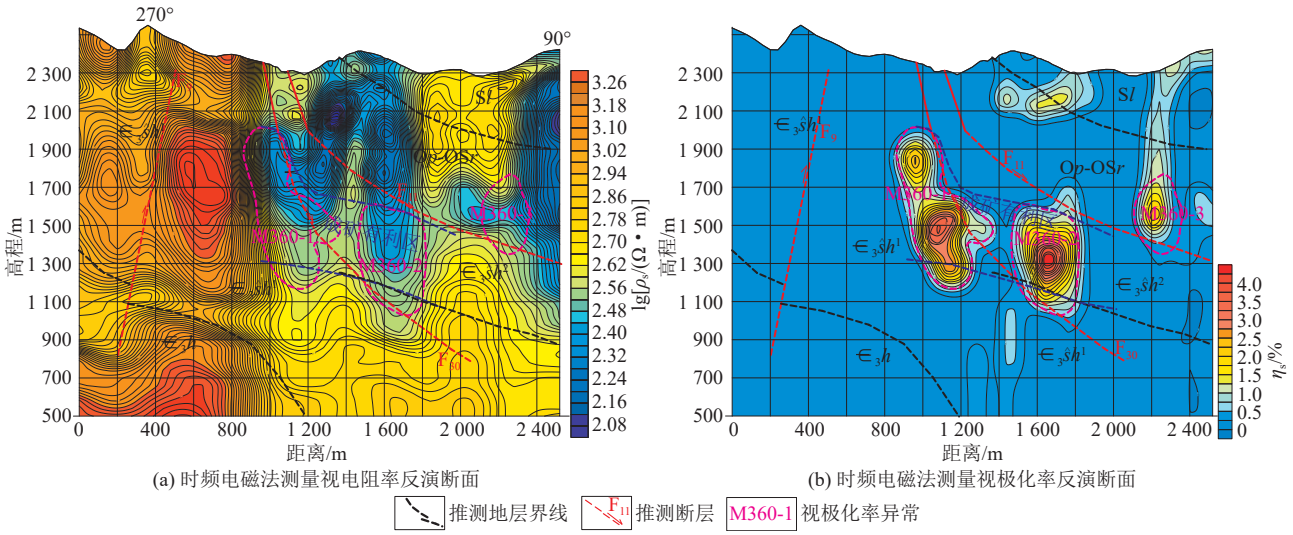
Fig. 3　1∶10 000 magnetic survey Δ*T* contour map (a) and Δ*T* polarization contour map (b)

区(Δ*T*>80 nT), 走向长约 450 m, 宽约 140 m, 带状高值异常区可能是磁性体头部位置的反映。据其形态推测该异常可能由 2 个(层)以上磁性体引起, 其中上部磁性体可能受 F_{11} 断层控制, 产状相对较陡, 下部磁性体产状变缓, 可能具有层控特征。

3.2　时频电磁法测量

在磁异常区布置了 3 条时频电磁法测量剖面, 剖面长 2 500 m, 点距 40 m, *AB* 极距 5.95 km, 收发距 6.75~7.75 km, 发射电流>25 A, 最大激发周期 16 s, 采用轴向偶极装置观测, 使用设备为俄罗斯最新一代 UCS-O2M 时频电磁发射系统和 AGE-XXL-24M 时频数据采集站。

由穿过磁异常中心的 360 线时频电磁法反演断面(图 4)可见, 视电阻率在测线方向上呈现出较明显的分区。西部视电阻率从地面到深部均表现为明显的高阻异常, 推断其应为沙河厂组及核桃坪组地层的反映; 东部视电阻率在垂向上呈近似 H 型曲线的 3 层电性特征, 浅部中高阻层推断为栗柴坝组泥质灰岩的反映, 中部低阻层为仁和桥组和蒲缥组碎屑岩地层, 底部中高阻层为沙河厂组。在断层方面, F_9 断层产状较陡, 在视电阻率上表现为横向上的凹陷和错动, F_{11} 和 F_{30} 断层产状较缓, 表现为垂向上的视电阻率梯度界面。在中部 F_{11} 及 F_{30} 断层分布位置出现显著的低阻异常, 位于推断的 F_{11} 断层下盘沙河厂组一段内, 所处地层对成矿有利, 为具有找矿意义的异常。



(a) 时频电磁法测量视电阻率反演断面　　(b) 时频电磁法测量视极化率反演断面

图 4　360 线时频电磁法测量反演断面

Fig. 4　Cross section of 360 line TFEM measurement inversion

区内 M360 线圈出 3 个高极化率异常, 其中 M360-3 异常位于推断的 F_{11} 断层上盘, 推断主要由仁和桥组炭质泥岩引起, 找矿意义不大。M360-1 和 M360-2 异常位于推断的 F_{11} 断层下盘, 视极化率变化范围为 1.5%~4.5%, 总异常倾向 E, 倾向延伸约 800 m, 分布标高主要在 1 300~1 700 m, 1 500 m 标高以上异常倾角约 50°, 以下约为 20°~30°, 产状变缓, 与磁测推断的磁性体产状基本一致。M360-1 和 M360-2 两个高极化率异常与 F_{11} 断层下盘低阻异常对应良好, 推断主要由矽卡岩型多金属矿引起, 找矿潜力较大。

4　找矿靶区圈定及找矿效果

4.1　找矿靶区的圈定

本次时频电磁法测量成果显示, 小水矿区视极化率异常主要集中分布于标高 1 300~1 700 m 处(图 5), 视极化率异常位于推断的 F_{11} 断层下部低阻区内, 且低阻高极化异常与Δ*T* 化极磁异常平面分布范围基本吻合(图 6), 反映了低阻高极化异常与磁异常可能由同一地质体引起。参考邻区金厂河铅锌铁多金属矿及黑岩凹铁多金属矿的矿床特征, 结合物探异常特征和物性成果, 明确了圈定本次找矿靶区的主要依据为: ①高精度磁测圈定的Δ*T* 化极磁异常; ②时频电磁法测量圈定的低阻高极化异常; ③低阻高极化异常及推断的磁性体所处的地层、构造等地质条件对成矿有利。据此在小水一带圈定找矿靶区一处, 靶区具有低阻、高极化、高磁异常, 与矽卡岩型多金属矿物性特征一致, 处于 F_{11} 断层下盘沙河厂组地层内, 多元找矿信息叠合好, 预测具有较好的寻找矽卡岩型多金属矿的潜力。

4.2　找矿效果

360 线穿过圈定的找矿靶区中心部位, 利用时频电磁法低阻、高极化异常为约束条件, 对该线磁测成

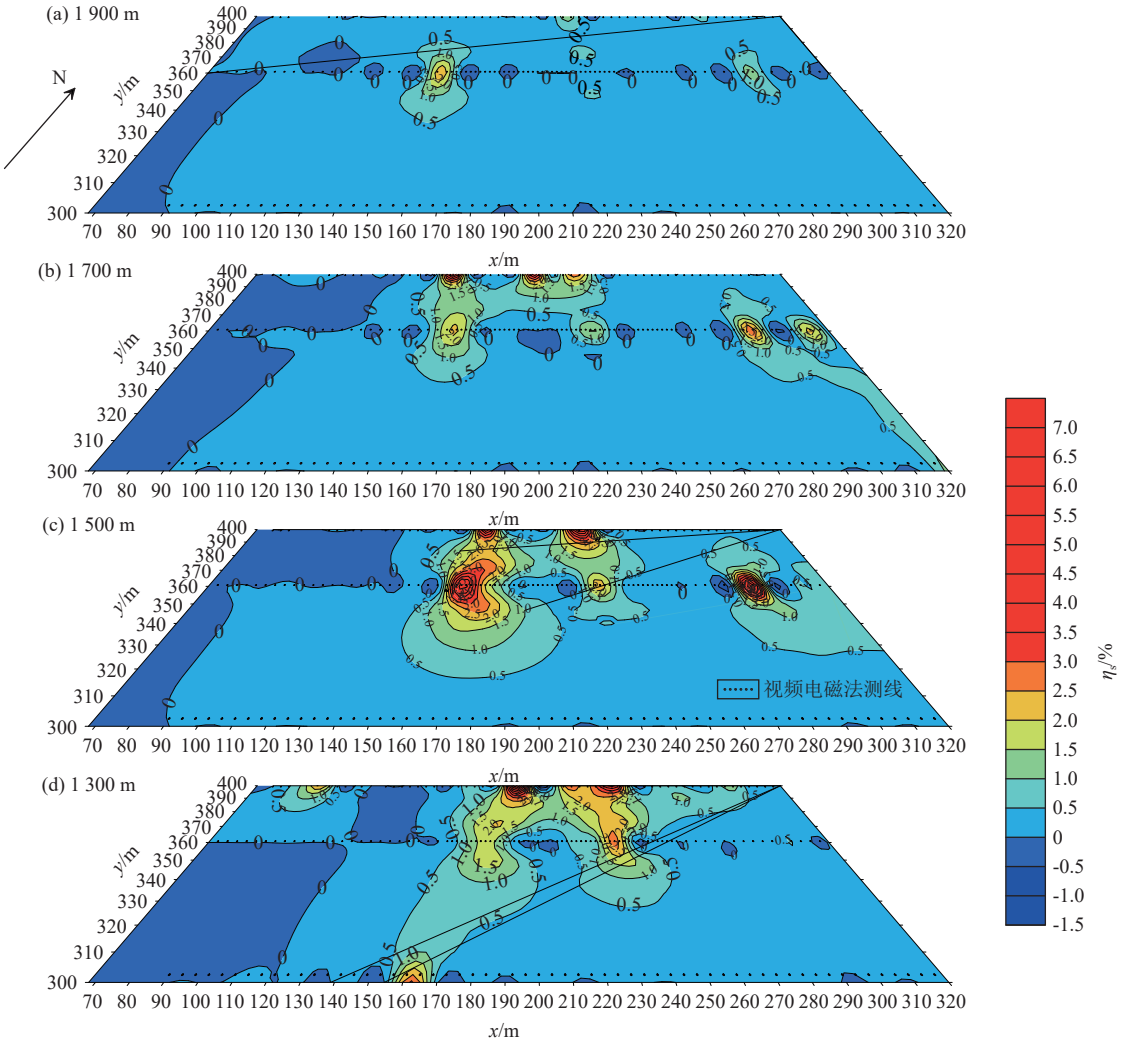


图 5　不同标高视极化率异常切面

Fig. 5　Sectional view of abnormal polarization at different elevations

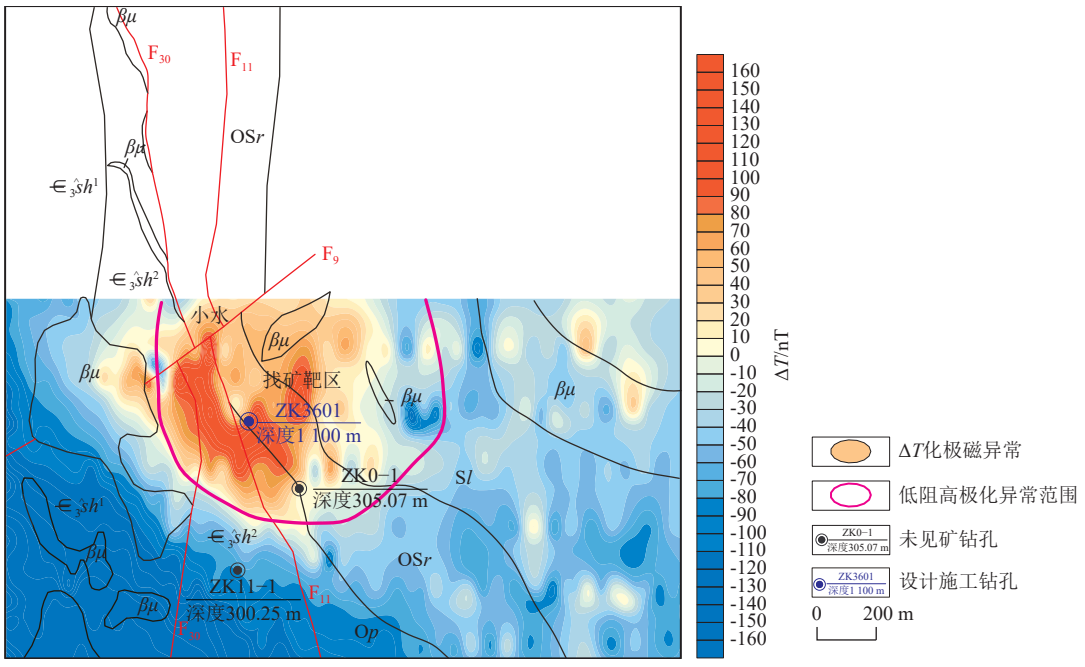
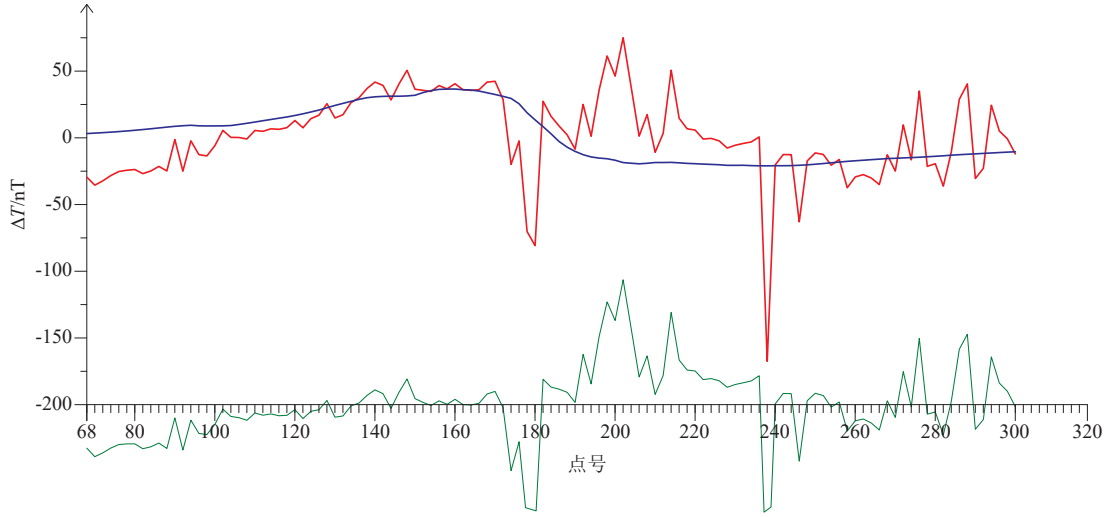


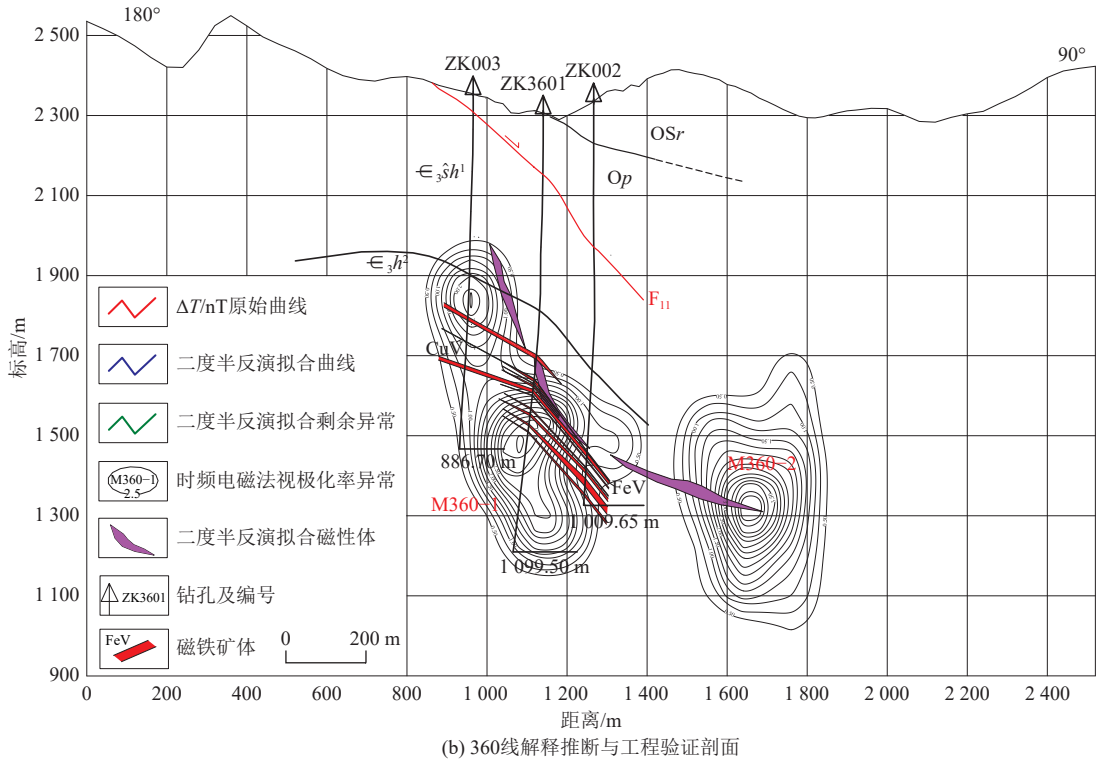
图 6　找矿靶区综合异常

Fig. 6　Comprehensive anomaly map of mineral target area

果进行二度半人机交互反演, 推断磁性体为产状上陡下缓的板状体, 头部标高在 1 900 m 左右, 往东延伸至标高 1 300 m, 总体位于时频电磁法视极化率异常的中上部(图 7), 二者对应良好。优选该线 182 号点布置验证孔 ZK3601, 在标高 1 700~1 500 m 揭露到多层矽卡岩型铁多金属矿体, 累计厚度近 80 m。后续在该线布置钻孔 ZK002、ZK003 控制矿体倾向延伸, 均在推断含矿部位揭露到对应矿层。目前矿区控制磁铁矿资源量已逾 600 万 t, 远景资源量有望达到中到大型。时频电磁法结合地面高精度磁测在该区深部隐伏矿勘查中取得了良好效果, 实现了找矿突破。



(a) 360线高精度磁测Δ*T*及反演拟合曲线



(b) 360线解释推断与工程验证剖面

图 7　360 线实测数据与解释结果

Fig. 7　Measured data and interpretation result of line 360

5　结论

金厂河矿集区以往勘探工作多围绕强磁异常开展, 对低缓磁异常的重视程度较低。本次对以往否定的低缓磁异常再研究, 重新评价其找矿意义, 采用时频电磁法和地面高精度磁测的方法技术组合, 在低缓磁异常区取得了显著的找矿成果。

1)矽卡岩型多金属矿体是矿集区内已知的唯一强磁性地质体,当其埋深较大时,地表观测到的磁异常往往较弱或难以显示,因而在评价区内低缓磁异常的找矿意义时应审慎,区内部分低缓磁异常及强磁异常的深边部仍有较大的找矿潜力,是今后找矿工作的重要方向。

2)相比于TEM、AMT、CSAMT等电磁法,时频电磁法能同时提供电阻率和极化率信息,这一优点有助于减少异常多解性,提高解释精度,降低钻孔验证风险,对深部金属矿勘查具有重要意义。

3)采用时频电磁法和高精度磁测综合探测方法,获取电、磁多元找矿信息,联合约束反演,精细定位区内矽卡岩型多金属矿体的赋存部位,经验证找矿效果显著,实现了矿集区深部隐伏矿勘查的新突破。这一方法技术组合对矿集区今后深边部找矿具有良好的示范意义,值得在类似金属矿勘查工作中推广应用。

参考文献(References):

[1] 刘学龙,周云满,赵成峰,等. 滇西保山地块金厂河铁铜铅锌多金属矿集区成矿系统与成矿规律 [M]. 武汉:中国地质大学出版社,2023.
Liu X L, Zhou Y M, Zhao C F, et al. The ore-forming system and laws of the Jinchanghe iron copper lead zinc polymetallic deposit in the Baoshan block of western Yunnan[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. 2023.

[2] 王基元,杨春海,符俊,等. 滇西金厂河金铜多金属矿集区成矿模式与综合找矿模型 [J]. 地质与勘探,2021,57(2):254−268.
Wang J Y, Yang C H, Fu J, et al. Metallogenic models and prospecting criteria for the jinchanghe Au-Cu polymetallic ore-concentration area in western Yunnan[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(2): 254−268.

[3] 吴小梅,高李阳,陈少伟. 云南保山市金厂河铜多金属矿床成因探讨 [J]. 云南地质,2020,39(2):179−185.
Wu X M, Gao L Y, Chen S W. A discussion about the genesis of jinchanghe cu multimetallic deposit in Baoshan, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2020, 39(2): 179−185.

[4] 李方兰,刘学龙,李守奎,等. 滇西保山地块金厂河铁铜铅锌多金属矿床电气石地球化学特征 [J]. 矿物学报,2024,44(6):911−926.
Li F L, Liu X L, Li S K, et al. Geochemical characteristics of tourmaline in the Jinchanghe iron-copper-lead-zinc polymetallic deposit in the Baoshan block in the western Yunnan[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2024, 44(6): 911−926.

[5] 杨孝武,官德任. 物化探在保山核桃坪矿床中的综合应用 [J]. 云南地质,2011,30(1):78−82.
Yang X W, Guan D R. The comprehensive application of geophysical and geochemical exploration to hetaoping ore deposit, Baoshan [J]. Yunnan Geology, 2011, 30(1): 78−82.

[6] 符德贵,崔子良,官德任. 保山金厂河铜多金属隐伏矿综合找矿[J]. 云南地质,2004,23(2):188−198.
Fu D G, Cui Z L, Guan D R. The comprehensive ore-prospecting of jinchanghe blind multimetallic deposit, Baoshan[J]. Yunnan Geology, 2004, 23(2): 188−198.

[7] 哈恩忠. 高精度磁测对寻找矽卡岩型矿床的特殊作用 [J]. 科技传播,2012,4(4):131.
Ha E Z. Special role of high-precision magnetic survey in finding skarn-type deposits[J]. Public Communication of Science & Technology, 2012, 4(4): 131.

[8] 席海山,孙天益. 高精度磁测在寻找矽卡岩矿床中的应用 [J]. 内蒙古科技与经济,2014(12):60−60,64.
Xi H S, Sun T Y. Application of high-precision magnetic survey in finding skarn deposits[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2014(12): 60−60, 64.

[9] 周云海,王备战,樊金生,等. 物探方法在谢坑矽卡岩型金铜矿勘查中的应用效果 [J]. 矿产与地质,2006,20(4):548−551.
Zhou Y H, Wang B Z, Fan J S, et al. Application result of geophysical method to prospecting of Xiekeng skarn type gold-copper deposit[J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(4): 548−551.

[10] 高春文,孙国庆,宋宗平,等. 时频电磁法在松辽盆地古中央隆起北部中的勘探应用 [C]//SPG/SEG 南京2020年国际地球物理会议,2020.
Gao C W, Sun G Q, Song Z P, et al. Exploration application of time-frequency electromagnetic method in the northern part of the ancient central uplift of the Songliao Basin [C]//SPG/SEG Proceedings of the 2020 International Geophysical Conference in Nanjing, 2020.

[11] 张鹏越,张亮,杨书江,等. 时频电磁法在塔西南山前油气勘探中的应用 [C]//2022年中国石油物探学术年会,2022.
Zhang P Y, Zhang L, Yang S J, et al. Application of time-frequency electromagnetic method in oil and gas exploration in the southern front of Tashi Mountain [C]//Proceedings of the 2022 China Petroleum Geophysical Exploration Academic Conference, 2022.

[12] 岑超. 时频电磁法结合重力圈定滇东北毛坪铅锌矿区深部找矿靶区 [C]//第二届矿产勘查大会,2023.
Cen C. Time frequency electromagnetic method combined with gravity to delineate deep mineral exploration targets in the Maoping lead-zinc mining area in northeastern Yunnan [C]// Proceedings of the 2nd Mineral Exploration Conference, 2023.

[13] 陈德炙,宋伟聪,李德春,等. 幅相—极化率电阻率解释系统在时频电磁法中的应用研究 [J]. 工程地球物理学报,2018,15(3):364−370.
Chen D Z, Song W C, Li D C, et al. The application of AP-IPR interpretation system to time and frequency electric method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(3): 364−370.

[14] 何展翔,董卫斌,赵国,等. 时频电磁(TFEM)技术:数据处理 [J]. 石油地球物理勘探,2021,56(6):1391−1399,1202-1203.
He Z X, Dong W B, Zhao G, et al. Time-frequency electromagnetic(TFEM)technology: Data processing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1391−1399, 1202-1203.

[15] 王有涛,何展翔,陈学国,等. 基于物性分析建模的时频电磁反演及储层评价——以准北缘石北构造带为例 [J]. 石油地球物理勘探,2022,57(6):1489−1497,1264.
Wang Y T, He Z X, Chen X G, et al. Time-frequency electromagnetic data inversion and reservoir evaluation based on physical prop-

erty analysis modeling: A case study of the Shibei structural belt on the northern margin of the Junggar Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(6): 1489−1497, 1264.

[16] 王珺璐, 陈辉, 罗先中, 等. 大功率—超大功率电 (磁) 探测技术进展与展望 [J]. 物探与化探, 2025, 49(4): 755−767.
Wang J L, Chen H, Luo X Z, et al. Progress and prospects of high-power ultra high power electric (magnetic) detection technology[J]. Geophysical and Chemical Exploration, 2025, 49(4): 755−767.

[17] 刘学龙, 李文昌, 周云满, 等. 滇西保山地块金厂河矿集区铁铜金铅锌多金属矿床成矿系统 [J]. 沉积与特提斯地质, 2022, 42(1): 133−150.
Liu X L, Li W C, Zhou Y M, et al. Metallogenic system of polymetallic Fe-Cu-Au-Pb-Zn deposits in Jinchanghe ore concentration district, Baoshan block, Southwest China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2022, 42(1): 133−150.

[18] 李振焕, 刘学龙, 罗应, 等. 云南保山地块金厂河 Fe-Cu-Pb-Zn 矿床成矿模式浅析 [C]//中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文集, 杭州, 2019: 544-545.
Li Z H Liu X L, Luo Y, et al. A preliminary analysis of the mineralization model of the Jinchanghe Fe-Cu-Pb-Zn-Deposit in Baoshan Block, Yunnan Province [C]//Proceedings of the 17th Annual Conference of the Chinese Society of Mineral, Rock and Geochemistry, Hangzhou, 2019: 544-545.

[19] 黄华. 云南金厂河铁铜铅锌多金属矿床地质特征及成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Huang H. The research on geological characteristics and metallogenesis of the jinchanghe Fe-cu-pb-zn polymetallic deposit, Yunnan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.

[20] 徐密, 段学斌, 朱正峰, 等. 保山金厂河矿集区陡崖多金属矿物化探异常特征及找矿潜力分析 [J]. 世界有色金属, 2024(10): 136−138.
Xu M, Duan X B, Zhu Z F, et al. Geophysical and geochemical anomaly characteristics and prospecting potential of the douya polymetallic ore in the jinchanghe ore concentration area of Baoshan[J]. World Nonferrous Metals, 2024(10): 136−138.

[21] 罗应. 滇西保山地块金厂河铅锌矿区辉绿岩地球化学、年代学特征及构造意义 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
Luo Y. Geochemistry, geochronology and tectonic significance of diabase in jinchanghe Pb-Zn deposit, Baoshan Block, western Yunnan Province[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.

[22] 罗应, 刘学龙, 李文昌, 等. 云南保山金厂河铁铜铅锌多金属矿床辉绿岩地球化学特征与 U-Pb 年龄 [C]//第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会, 2017.
Luo Y, Liu X L, Li We C, et al. The geochemical characteristics and U-Pb ages of diabase in the Jinchanghe iron copper lead zinc polymetallic deposit in Baoshan, Yunnan [C]//Proceedings of the 8th National Symposium on Mineral Theory and Exploration Methods Nanchang, 2017.

Application of the time-frequency electromagnetic method and high-precision magnetic survey in the exploration of deep concealed ores

XU Mi, DUAN Xue-Bin, ZHENG Xiao-Long, YE Li-Mei, QIN Hai-Lin, LI Tian, YANG Yi, TENG Run-Yi

(*Yunnan Gold Mining Group Co., Ltd., Kunming* 650200, *China*)

Abstract: The Jinchanghe ore concentration area in the Baoshan block, Yunnan Province, is located in the northern part of the Baoshan-Zhenkang lead-zinc-copper polymetallic metallogenic belt. This area primarily hosts skarn iron-copper-lead-zinc polymetallic deposits. Previously, strong magnetic anomalies served as the primary geophysical exploration indicators for mineral prospecting in this area, while weak magnetic anomalies gained insufficient attention. Therefore, this study investigated weak magnetic anomalies in this area to reveal their promising potential for mineral prospecting. The time-frequency electromagnetic method and the high-precision magnetic survey were combined to verify weak magnetic anomalies, obtaining information on electrical and magnetic anomalies. Based on geological conditions, the joint inversion of multiple parameters was performed to delineate prospecting targets and precisely determine the spatial morphologies and occurrence locations of deep concealed ore bodies. Through borehole verification, the combined method achieved significant prospecting results. This study serves as an exemplary case for mineral prospecting in the deep and marginal parts of this area and also a reference for the exploration of similar deposits in other areas.

Key words: skarn; time-frequency electromagnetic method; high-precision magnetic survey

（本文编辑: 王萌）