

doi: 10.11720/wtyht.2021.1237

龚胜平, 陆桂福, 席明杰, 等. 干旱荒漠区综合物化探方法寻找铜多金属矿[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 1-10. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1237>

Gong S P, Lu G F, Xi M J, et al. The application of integrated geophysical and geochemical methods to the prospecting of copper polymetallic deposits in the arid desert area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 1-10. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1237>

干旱荒漠区综合物化探方法寻找铜多金属矿

龚胜平^{1,2}, 陆桂福¹, 席明杰¹, 马生明¹, 苏文利¹

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京) 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘要: 为了研究在干旱荒漠区矿产检查工作中的有效物化探方法组合, 实现地区找矿突破, 以内蒙古黑鹰山地区某矿产检查调查区为例, 探寻物化探方法寻找铜多金属矿的工作方法技术。调查区开展了 1:1 万地质测量、大功率激电、高精度磁测及 1:5 万热磁组分土壤测量面积工作。通过数据处理, 圈定了 2 处激电异常和 5 处磁异常, 区内也出现具有多元素组合异常特征的化探异常。在激电异常与元素异常浓集部位布置了可控源音频大地电磁测深剖面, 确定了两个良导异常向下展布情况。探槽结果显示: 在公婆泉组钠长阳起岩夹变质石英砂岩和大理岩接触处发生强烈硅化、矽卡岩化和孔雀石化; 探槽样品中, 多个样品中的 Cu、Ag 含量达到边界品位。区内找矿前景良好, 可以开展进一步工作。

关键词: 干旱荒漠区; 综合方法; 多金属矿; 内蒙古

中图分类号: P632

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)01-0001-10

0 引言

随着中国东部矿产资源日益枯竭, 大面积的荒漠戈壁特殊地理景观地区有望成为下一个矿产资源接替基地。前人在覆盖区找矿进行了一些理论与实践^[1-8], 而在西北部的干旱荒漠特殊景观区进行隐伏矿床的勘查研究目前仍然显得较为薄弱, 主要体现在: ①荒漠戈壁覆盖层厚度大, 分布不均一, 地球物理异常较弱; ②干旱缺水, 供电困难; ③覆盖层对地表地球化学异常也有较大的屏蔽和衰减作用。目前需要一些既能提高信号强度, 又能加大勘探深度的物化探方法, 如大极距激电方法^[9-11]、深穿透地球化学方法^[12]、土壤热磁组分测量等, 解决该地区寻找隐伏矿的难点问题。

内蒙古黑鹰山地区是典型的干旱荒漠区, 地质构造复杂, 岩浆活动强烈, 成矿地质条件优越, 形成了铜、金、铀、铁、镍、钼等金属矿产和重晶石、白云

石、石膏等非金属矿。近年来在该地区开展了多项地质勘查和科研工作^[13-18], 使用了磁法、电法及水系沉积物测量等工作手段, 包括三维地球物理勘查试验^[19-20], 发现了一批新的矿床(点)、矿化点及物化探异常。笔者利用大功率激电、磁法、可控源音频大地电磁测深等地球物理方法及热磁组分测量地球化学勘查方法开展干旱荒漠区的铜多金属矿的勘查工作, 分析综合物化探异常特征, 研究本调查区作为找矿靶区的可行性, 为下一步开展详查及钻探工程提供依据。

1 调查区概况

1.1 地质概况

调查区位于内蒙古黑鹰山地区额济纳旗以西 250 km。根据 1:1 万专项地质测量结果, 区内出露地层主要为上奥陶—下志留统公婆泉组, 岩石组合主要为钠长阳起岩、钠长阳起片岩夹少量大理岩、变

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-09-05

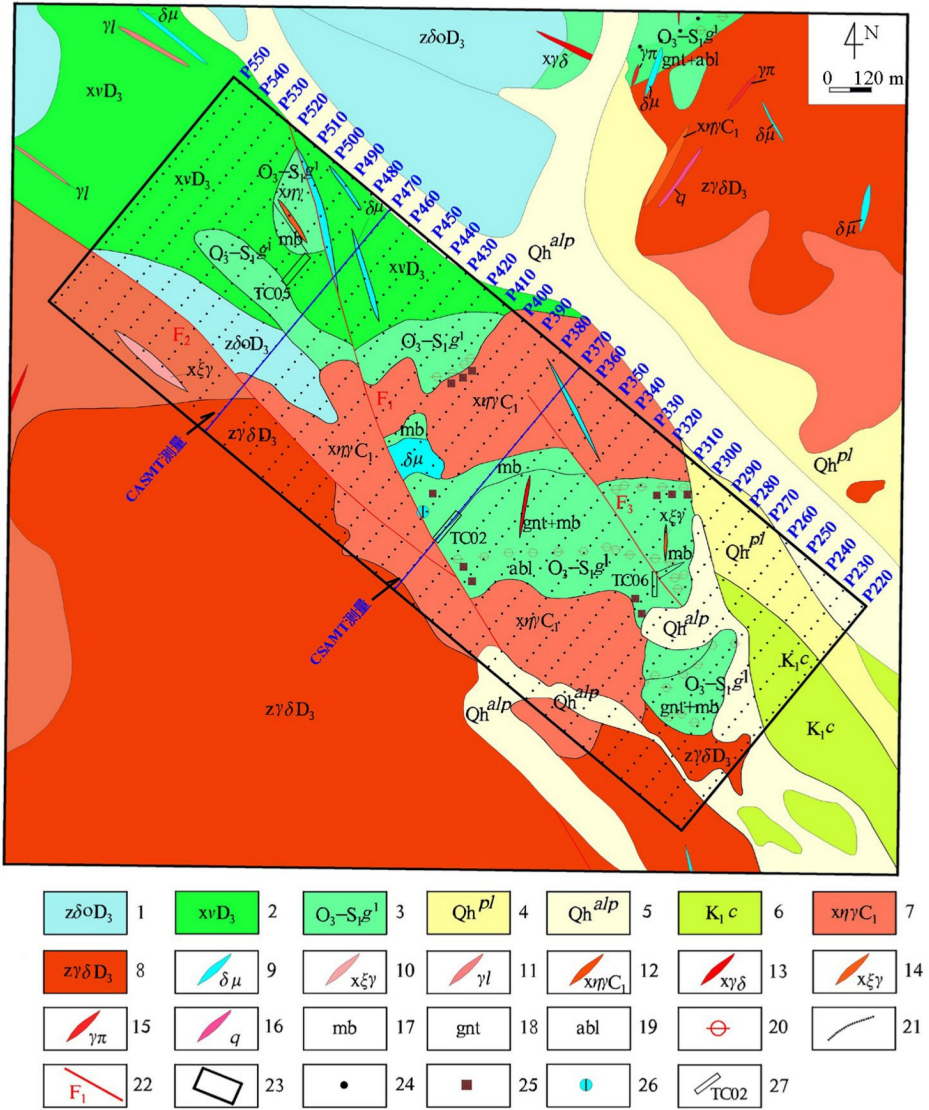
基金项目: 中国地质调查局项目“重要金属非金属矿产地质调查计划”(DD20190571); 国家重点研发计划项目(2018YFE0208300); 中国地质调查局项目“基础性公益性地质矿产调查”(121201108000150002)

作者简介: 龚胜平(1980-), 男, 汉族, 湖北人, 博士研究生, 高级工程师。研究方向: 地球物理勘查。Email: gsp122012@126.com

质粉砂岩,其中钠长阳起岩、钠长阳起片岩分布于调查区中部,大理岩分布于其南北两侧(图1)。钠长阳起岩、钠长阳起片岩呈灰绿色,柱粒状变晶结构,块状构造、片状构造,岩石绿帘石化明显,呈条带状、透镜状沿裂隙或片理产出。大理岩呈灰白色,粒状变晶结构,块状构造,宏观呈薄层状,片理化明显,岩

内见矽卡岩化带,主要分布于地层区南部,呈灰绿色、铁褐色,粒状变晶结构,块状构造,主要成分为石榴子石、石英。

区内侵入岩发育,主要包括晚泥盆世细粒角闪辉长岩、石英闪长岩、中粒花岗闪长岩和早石炭世细粒二长花岗岩。细粒角闪辉长岩主要分布于该区西



1—中粒石英闪长岩;2—细粒角闪辉长岩;3—上奥陶统-下志留统公婆泉组一段变粒岩;4—第四系全新统砂砾石、粉砂、细砂;5—第四系全新统冲洪积物;6—白垩系赤金堡组含砾粗砂土;7—细粒二长花岗岩;8—中粒花岗闪长岩;9—青灰色闪长玢岩脉;10—肉红色细粒钾长花岗岩;11—花岗细晶岩;12—细粒二长花岗岩脉;13—细粒花岗闪长岩;14—细粒正长花岗岩;15—细粒花岗斑岩脉;16—石英脉;17—大理岩;18—变粒岩;19—钠长阳起片岩;20—矽卡岩化;21—岩相界线;22—断裂构造;23—调查区范围;24—物化探测点;25—褐铁矿化;26—铜锌矿化点;27—探槽位置及编号

1—medium-grained quartz diorite; 2—fine-grained hornblende gabbro; 3—metagranite of the first member of Gongpoquan formation in upper Ordovician-lower Silurian; 4—sandy gravel, silt, fine sand of Quaternary Holocene; 5—alluvial deposits of Quaternary Holocene; 6—gravel-bearing sandy soil of Chijinbao formation of Mesozoic; 7—fine-grained monzonitic granite; 8—medium-grained granodiorite; 9—blue-gray diorite porphyrite vein; 10—red meat fine-grained K-feldspar granite; 11—granite acelite; 12—fine-grained monzonite vein; 13—fine-grained granodiorite; 14—fine-grained syenogranite; 15—fine-grained granite porphyry vein; 16—quartz vein; 17—marble; 18—metagranite; 19—albite-actinolite-schist; 20—skarnization; 21—lithofacies boundary; 22—fault structure; 23—survey area; 24—geophysical and geochemical survey points; 25—limonite mineralization; 26—Cu-Zn mineralization station; 27—trough location and number

图1 调查区地质图与工作布置

Fig. 1 Geological map and work arrangement in the survey area

北部,呈 NW 向展布,受 NW 向断层控制明显,侵入上奥陶一下志留统公婆泉组,并被晚泥盆世石英闪长岩侵入。泥盆纪细粒石英闪长岩分布于调查区西部,辉长岩南侧,被早石炭世细粒二长花岗岩侵入,基岩裸露,地表球状风化特征明显,岩石呈细粒结构,块状构造,局部弱定向构造,主要成分为斜长石、角闪石、黑云母、钾长石与石英,矿化蚀变特征不明显。泥盆纪中粒花岗闪长岩主要分布于调查区东北、西南部,呈较大规模岩基产出,侵入上奥陶一下志留统公婆泉组,被早石炭世细粒二长花岗岩侵入,岩石呈浅灰色,细粒结构,块状构造,局部弱定向构造,矿物粒度 2~3 mm,主要成分为石英、斜长石、钾长石、暗色矿物黑云母,岩内有砖红色细粒二长花岗岩细脉侵入,矿化蚀变特征不明显。石炭纪细粒二长花岗岩主要分布于公婆泉组地层区南北两侧,侵入公婆泉组及晚泥盆世花岗闪长岩,岩石呈粉灰色—砖红色,细粒—中细粒结构,块状构造,主要由石英、斜长石、钾长石及少量黑云母组成,岩石较均匀,暗色矿物含量少,岩内局部钾化明显,与大理岩

接触带附近多形成矽卡岩化带、绿帘石化、褐铁矿化,与成矿关系密切,形成了多条矿化蚀变带,成矿地质条件优越。

区内脉岩发育,主要包括闪长玢岩脉、细粒二长花岗岩脉、正长花岗岩脉、石英脉、花岗斑岩脉,多呈 NW 向或近 SN 向展布。

区内构造(F₁、F₂、F₃)主要为 NW 向断层,主要沿沟谷展布,规模较大,控制着公婆泉组地层与矿化分布范围。

1.2 物性特征

根据地表采集标本,实验室测定的物性参数,区内岩矿石的极化率值普遍不高,电阻率值范围变化幅度(数百至几千)较大,其中大理岩与绿帘石化斜长角闪岩呈现相对低阻,辉长岩、石英闪长岩为高阻,其余岩石基本呈现中高阻特征。矿化斜长角闪石具备相对中高极化率特征。岩石磁性变化较大,石英闪长岩、钠长阳起片岩、辉长岩具有高磁性,大理岩、正长花岗岩基本无磁性(表 1)。以上岩矿石的物性差异使物探测量具备应用前提。

表 1 岩矿石物性统计
Table 1 Physical properties of the rock

岩石名称	样品数	电阻率/(Ω·M)		极化率/%		磁化率/(10 ⁻⁶ SI)	
		常见值	变化范围	常见值	变化范围	常见值	变化范围
钠长阳起片岩	29	3315.9	205.2~13949.4	2.02	0.97~3.0	37355.2	85.7~91341.7
角闪辉长岩	30	3727.6	1023.6~28174.4	2.0	1.14~4.29	7260.0	294.0~42323.7
石英闪长岩	30	6581.6	1393.3~11322.5	0.7	0.4~2.3	3466.7	176.2~13904.6
二长花岗岩	30	1706.4	778.4~7123.4	2.68	1.15~4.63	116.6	0.9~1434.2
花岗闪长岩	21	1804.9	757.1~7927.2	3.01	0.92~4.05	1095.2	52.1~4695.1
正长花岗岩	12	2004.9	1161.1~3815.7	2.7	1.8~4.1	92.6	2.9~203.7
闪长玢岩	10	7429.2	2209.1~11228.2	2.3	0.8~3.0	102.2	88.1~363.2
钾长花岗岩	30	700.0	435.0~2481.9	2.5	1.8~3.5	202.5	36.4~696.1
大理岩	36	989.8	830.5~1455.5	0.12	0.05~0.19	3.70	1.0~9.7
斜长角闪岩(绿帘石化)	32	95.3	80.2~9991.2	2.0	0.61~3.45	552.2	359.5~7579.3
斜长角闪岩(黄铁矿化)	35	1220.5	571.0~2068.2	2.25	2.25~3.01	471.7	179.0~455.0

2 工作布置

调查区物探测线布置见图 1 所示。共布置了 34 条测线,每条测线 30 个点,长 1.16 km,测线方向 40°,测量网度为 100 m×40 m,勘查面积 3.83 km²。测点从西南至东北依次变大,最小点号为 102。调查区进行了大功率激电扫面、高精度磁测及热磁组分土壤测量工作,根据异常情况,在测线 P370、P470 同点位布设了可控源音频大地电磁测深工作,选择异常较好部位进行了槽探工作(TC02、TC05、TC06)。

万方数据

3 地球物理勘查

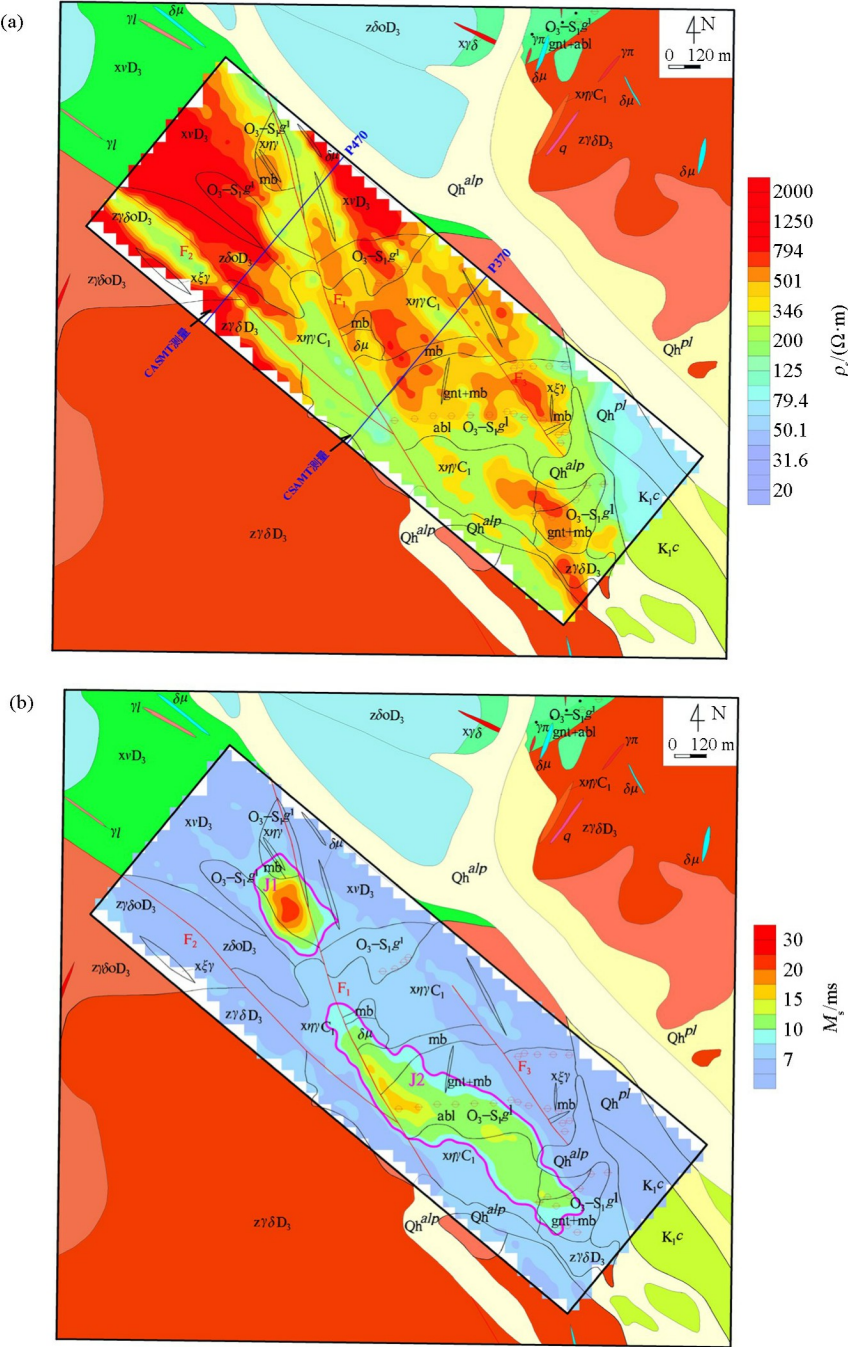
3.1 大功率激电测量

本次电法测量仪器为 GDP32^{II} 系统,采用中间梯度装置。该装置的特点是:敷设一次供电电极(A、B),可在 AB 之间一个较大的范围内观测。荒漠覆盖区气候炎热、干旱少雨,近地表均分布有厚度不等和非常坚硬的特高阻盐碱壳层,在盐渍壳下面,由于盐碱化作用,大地电阻率呈低阻。为确保信噪比及有效勘探深度,工作中选择供电电极距为 1 800 m,接收极距为 40 m。采用占空比 50%双向方波供电。质检率 3.82%,质检视电阻率、视充电率均方

相对误差分别为 0.68%、2.38%,符合相关规范。盐渍壳接地电阻很高,通过采取增加供电电极数量和浇灌盐水等方法,改善供电电极接地条件,改善了沙漠地区的供电难度大的问题。接收电极接地也采用浇灌盐水方法,保证较小的接地电阻。

大功率激电扫面工作的测量结果如图 2 所示。

从图中可以看出,中粒花岗闪长岩所在位置地表测量结果基本显示为高阻,第四系覆盖区与白垩系赤金堡组测量结果显示为低阻,其余岩性的地表测量电阻率值呈高低变化特征。异常的展布方向均与调查区地层、构造走向基本一致。由 F_1 、 F_2 断裂位置可知,视电阻率值的变化转折位置为明显的断裂部位。



a—视电阻率平面图;b—视充电率平面图;构造为地质实测,地球物理色标仅应用于调查区范围内,地质背景图例见图 1,图 3~6 同

a—the plan view of apparent resistivity;b—the plan view of apparent chargeability;the fracture is measured by geological means, and the geophysical color unit is only used in the survey area,the geological legend is shown in Fig. 1,and Fig. 3~Fig. 6 are the same

图 2 激电中梯测量视电阻率 (a) 与视充电率 (b) 等值线平面图

Fig. 2 Contour maps of the apparent resistivity (a) and apparent chargeability (b) of the TDIP survey

万方数据

区内视充电率背景值为 5~9 ms,按 13 ms 视充电率圈出两个相对独立的激电异常(编号为 J1、J2),异常均由 F_1 控制。J1 异常为环状异常,面积较小,平均宽度约 200 m,位于泥盆纪细粒角闪辉长岩与上奥陶—下志留统公婆泉组一段变粒岩的侵入接触部位,呈现高充电率(17~30 ms)、低阻(约 $200 \Omega \cdot m$)特征。J2 异常呈“W”形状,呈现中高极化(10~17 ms)与中阻($200 \sim 794 \Omega \cdot m$)特征,既位于石炭纪细粒二长花岗岩与上奥陶—下志留统公婆泉组一段变粒岩接触部位,也处于构造 F_1 与 F_2 的交汇位置,成矿条件十分有利,是需要重点关注的异常。

3.2 高精度磁测

本次使用 PMG-2 型质子磁力仪进行高精度磁测。仪器开工前后依据规范经过噪声水平测试、一致性测试等性能试验,确保仪器工作正常。调查区人迹罕至,干扰小,质检率 4.52%,质检磁异常均方相对误差为 ± 1.32 nT,满足相关规范要求。对资料进行日变改正与数据网格化、化极处理、200 m 向上延拓等,突出深层异常特征。

化极后的磁异常等值线平面如图 3 所示,图中圈定了 5 个磁异常,由图可见磁异常展布方向与矿区地层、构造走向基本一致。

磁异常 M1、M3 位于调查区西北部,推测为辉长岩引起。区内激电异常 J1 位于磁异常高低变化的

负值区,推测为构造作用引起局部的磁性变化。M2 异常为一较大范围的高磁异常,异常值在 750 nT 以上,异常宽度约 300 m。结合岩矿石磁性特征(表 1)及地质岩相界线范围可知,该处高磁异常与上奥陶—下志留统公婆泉组位置吻合,为钠长阳起片岩引起。磁异常等值线北侧较疏,南侧较密,说明高磁异常体为向北倾向。高磁异常南侧伴生负磁异常,异常幅度为-100~-200 nT。激电异常 J2 处于磁异常 M2 南侧梯度带上。向上延拓(图 4)的结果表明,深部异常主要为调查区中部高磁异常体的反映,该异常中心随深度增加略向北移,也说明了异常体的北倾方向。南端高磁异常 M4 为隐伏变粒岩引起,局部磁异常 M5 为岩脉引起。

3.3 可控源音频大地电磁测量

可控源音频大地电磁法采用标量测量方式,测量的频率范围为 1~8 192 Hz。 $AB=1$ km,收发距为 5 km。测量过程中采用 6 个电道共用一个磁道的方法,共用磁道位于每个排列的中间部位。质量检查点卡尼亚电阻率与阻抗相位均方相对误差分别为 2.78%、4.5 mrad,满足相关规范要求。数据处理使用圆滑模型一维反演程序 SCSINV。

测量结果由图 5 所示,反演深度 1 km。由反演结果可知地质体的断面分布及深部延伸情况。异常在断面图上显示为低阻良导体(J1、J2)赋存于高阻

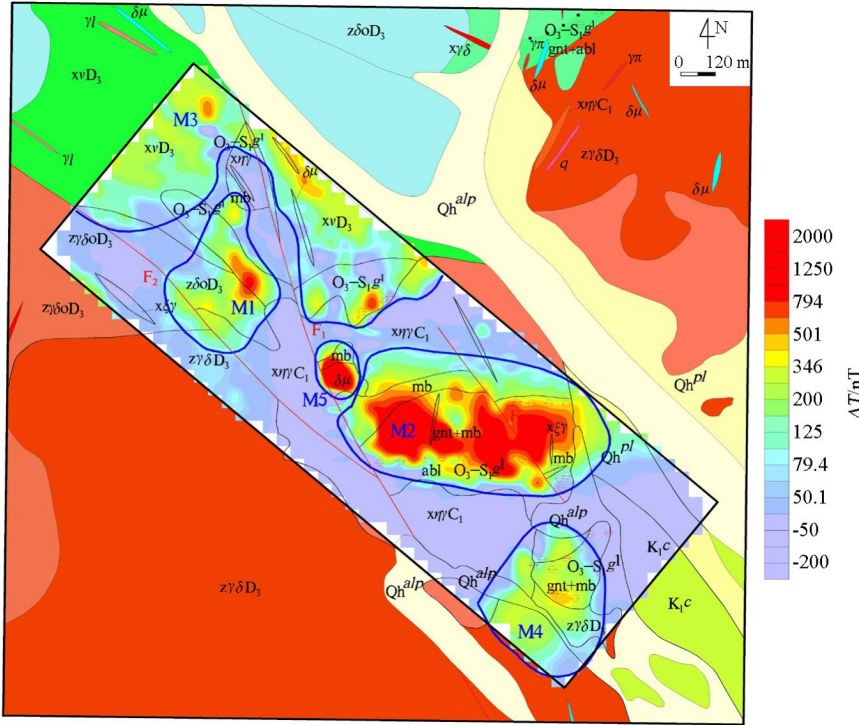


图 3 磁异常化极等值线平面

Fig. 3 Contour map of magnetic anomalies after pole reduction

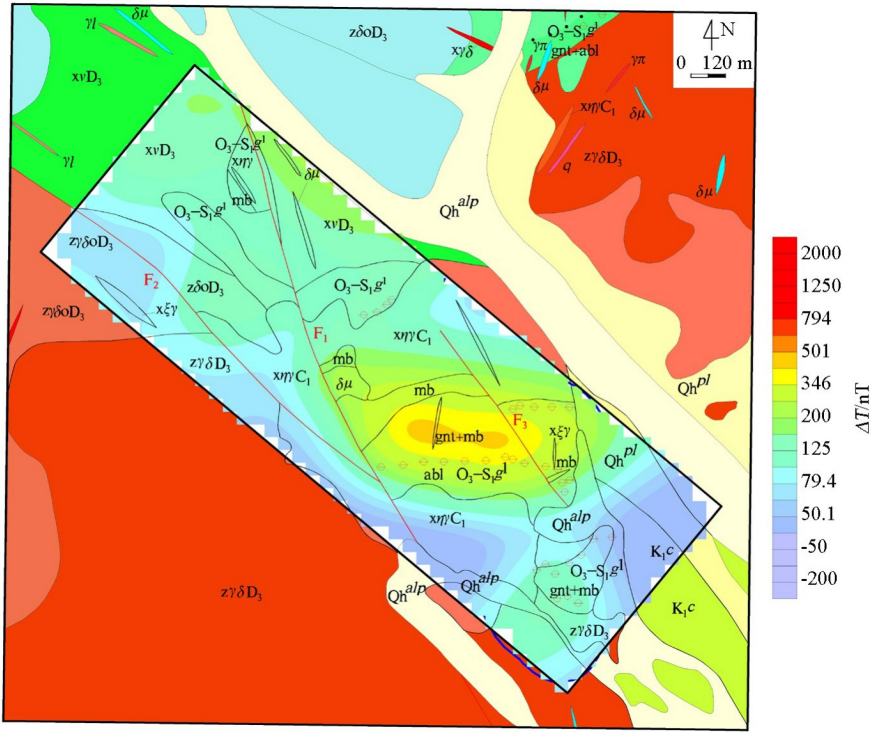


图 4 磁异常向上延拓 200 m 等值线平面

Fig. 4 Contour map of magnetic anomalies after upward extension 200 m

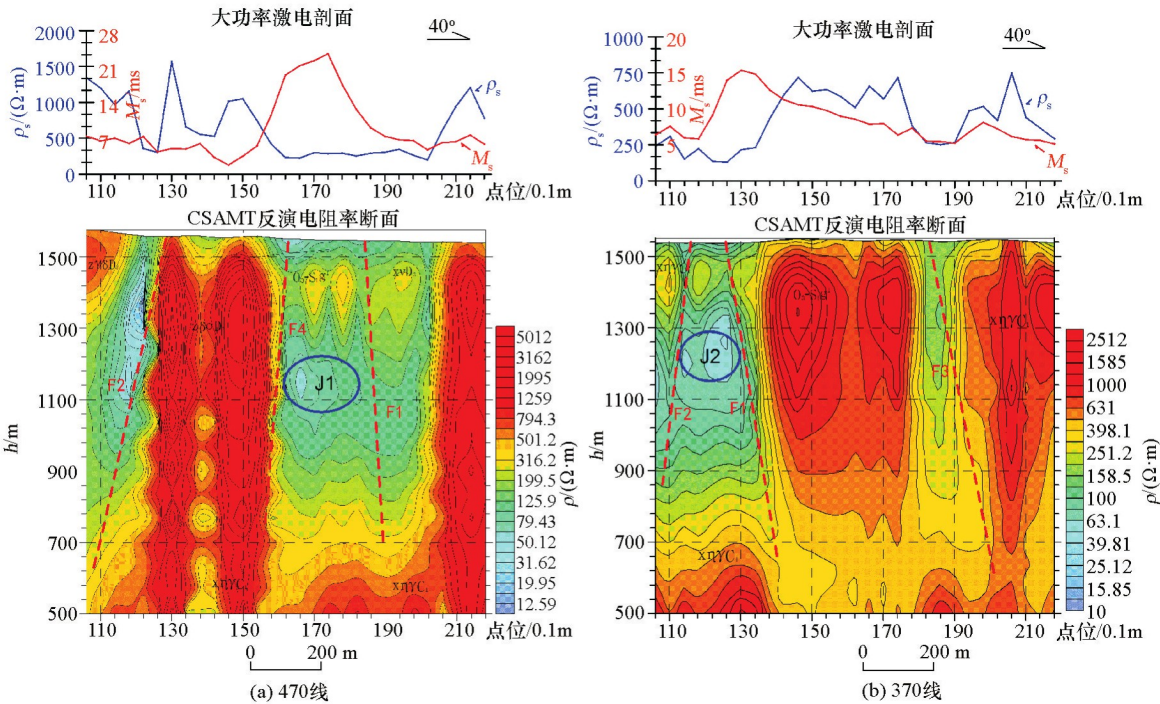


图 5 470 线 (a)、370 线 (b) 综合电法勘查剖面及推断解释

Fig. 5 Integrated electrical survey profiles and inferred interpretation map of 470 line (a), 370 line (b)

地质体围岩中,推测为隐伏矿(化)体。470 线显示异常 J1 中心埋深约 400 m,产状较陡立。370 线显示异常 J2 埋深约 300 m,从等值线的扭曲方向判断岩性接触面方位角为 NE 向。

4 地球化学勘查

本次地球化学勘查采用 1:5 万土壤热磁组分测

量。土壤热磁组分测量是针对运积物覆盖区而提出的一种地球化学勘查方法^[21]。土壤热磁组分以铁锰氧化物为主,由土壤中的非晶质铁锰氧化物转化而来,其原理为利用焙烧将土壤中的非晶质铁锰氧化物转换为磁性物质,再利用电磁分选的方法将这种物质分选出来,测定其中的矿化指示元素含量。该方法可以有效提高地球化学异常强度,发现微弱成矿信息。

图 6 为 Au、Cu 等 12 种元素地球化学异常剖析图,异常区范围主体较小,面积约 1 km²。异常主要集中在激电异常 J2 位置,Au、Ag、Sb、As 等元素异常有沿着 F₁ 构造向北延伸至异常 J1 的趋势。区内元素组合齐全,低温成矿元素组合(Au、As、Sb 等)、中温成矿元素组合(Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等)、高温成矿元素组合(Cu、Mo 等)异常套合较好(表 2)。Ag 极大值为 0.94×10⁻⁶,同一点 As 含量为 31.3×10⁻⁶,Au 为 23.2×10⁻⁹,Sb 为 36.8×10⁻⁶,远高于背景值,主要是单高值点形成的异常;异常区内 Cu 极大值达到

586×10⁻⁶,Pb 为 108×10⁻⁶,Zn 异常范围相对较小;W 极大值为 14.1×10⁻⁶,Sn 为 12×10⁻⁶,Mo 为 27.8×10⁻⁶;Cd 单点极大值 1030×10⁻⁹。此外 Na₂O 在异常区出现明显贫化,负异常反映成矿地球化学环境范围^[22]。据此,推断调查区综合异常区是由单点高值点形成的多元素综合异常,多个成矿元素、成矿伴生元素形成极大值,异常很有意义。比较 NAP 值可确定成矿元素为 Ag、Mo、Cu。地球化学异常上看,基本上是以成矿元素为中心,前缘元素(Sb、Au、As)异常和后尾元素(W、Sn)异常与之套合或重叠。除 Sb 异常范围较大外,前缘元素与后尾元素在异常强度和面积上大致相当,并且两组元素异常同时出现,说明本矿床基本为中等剥蚀程度。矿(化)体 J1 远离地球化学异常浓集中心,结合地球物理异常,该矿(化)体向深部延伸较浅,纵向矿化范围约 300~540 m;矿(化)体 J2 位于地球化学浓集中心,向深部延伸较深,纵向矿化范围约 300~640 m。

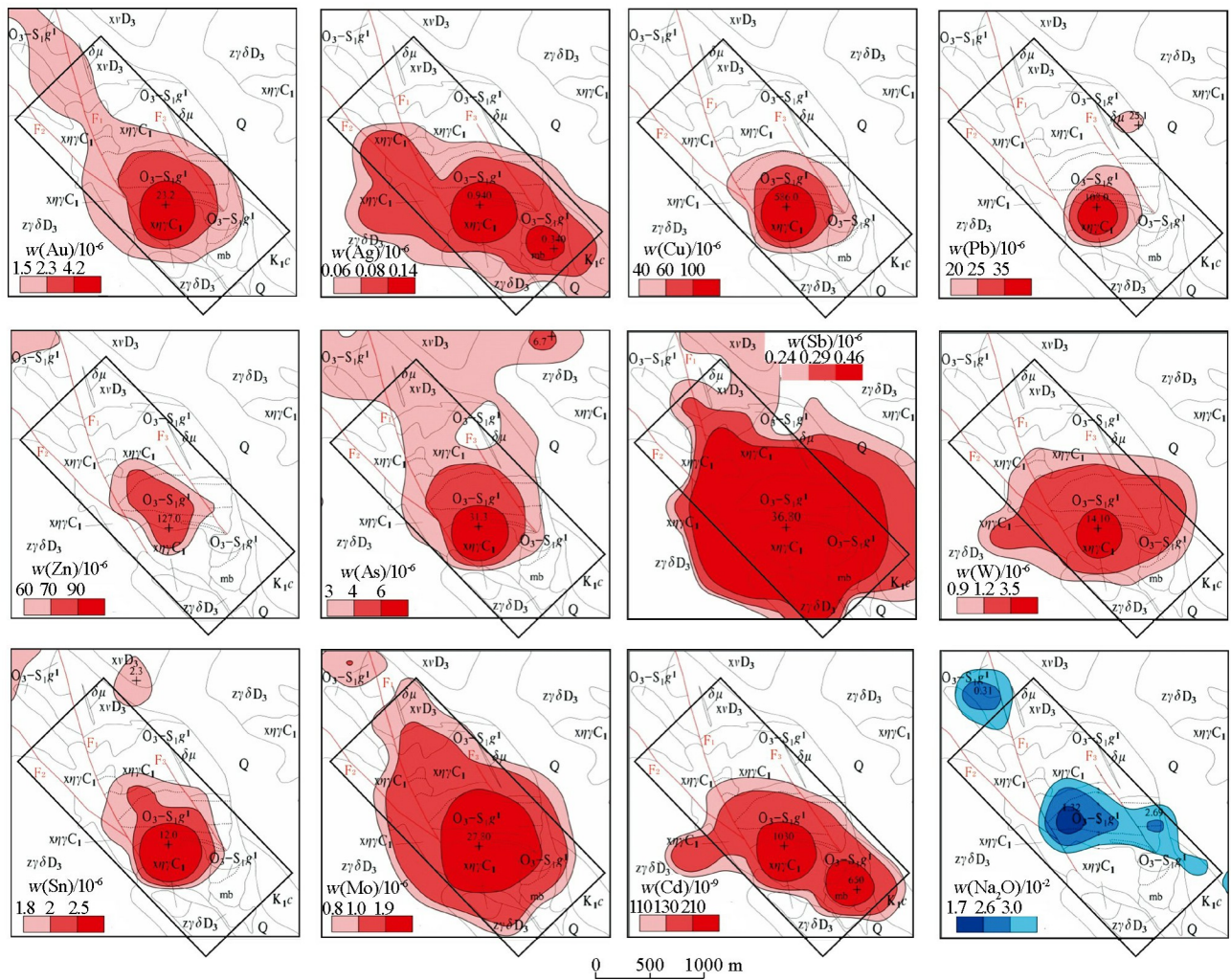


图 6 地球化学异常剖析

万方数据

Fig. 6 Analyze map of geochemical anomalies

表 2 地球化学异常参数统计
Table 2 Statistics of geochemical anomalies

元素	异常面积/km ²	平均值/10 ⁻⁶	最高值/10 ⁻⁶	异常下限/10 ⁻⁶	异常衬值	NAP 值	异常点数/个
Au	1. 76	5. 40×10 ⁻³	23. 2×10 ⁻³	1. 50×10 ⁻³	3. 60	6. 3	7
Ag	2. 82	0. 21	0. 94	0. 06	3. 50	9. 9	10
Cu	1. 04	163	586	34. 1	4. 78	5. 0	5
Pb	1. 96	28. 0	108	14. 4	1. 94	3. 8	9
Zn	0. 48	95. 9	127	60. 0	1. 59	0. 8	6
As	1. 45	9. 50	31. 3	3. 00	3. 16	4. 6	6
Sb	3. 07	3. 47	36. 8	0. 24	14. 46	44. 4	13
W	1. 81	3. 25	14. 1	0. 91	3. 57	6. 5	9
Sn	1. 88	2. 80	12. 0	1. 50	1. 87	3. 5	10
Mo	2. 47	3. 54	27. 8	0. 76	4. 65	11. 5	13
Cd	2. 35	277×10 ⁻³	1030×10 ⁻³	91. 0×10 ⁻³	3. 04	7. 1	11

注:NAP 为规格化面金属量,为平均异常强度(平均衬度)与异常面积的乘积。

5 探槽结果

在调查区 J1、J2 异常处分别开展了探槽 TC05、TC02 工作,其中 TC05 位于 370 线,TC02 位于 480 线附近,另外根据化探异常在 290 线中部布置探槽 TC06(图 1)。探槽揭露显示,在公婆泉组钠长阳起岩夹变质石英砂岩和大理岩接触处具有强烈的硅化、矽卡岩化和孔雀石化。刻槽样分析结果(表 3)显示有 7 件样品 Cu 含量已达到或超过边界品位,6 件达到边界品位一半以上,另外 1 件样品 Ag 达到边界品位,说明已发现浅部矿体。

该干旱荒漠区成矿地质条件优越,本次矿产检查工作采用了 3 种物探方法,另外使用了能强化覆盖区异常的热磁组分测量地球化学方法。从经济与

效果角度来看,高精度磁测、大功率激电在本区比其他方法较为经济,大功率激电、可控源及土壤地球化学找矿效果较好。建议组合采用土壤地球化学测量及大功率激电,最后部署 CSAMT 测量控制矿(化)体向下延伸,以达到既经济又实用的找矿效果。

石炭纪细粒二长花岗岩与大理岩接触部位形成矿体,F₁ 构造为控矿构造。各物化探方法在该区同时出现异常:①大功率激电测量在地表圈定两处低阻高极化异常;②磁测显示激电异常位于磁异常的强梯度带上;③土壤测量显示出各种元素组合异常。可控源音频大地电磁测深结果显示深部存在隐伏矿(化)体,圈定的激电异常和化探异常浓集区都是该区勘查铜多金属矿的直接找矿标志,并且物化探异常的展布方向均与地层、构造的走向一致,说明异常与地质构造关系密切,异常具有重要的找矿意义。

表 3 调查区刻槽样分析结果
Table 3 Analysis results of the grooved samples in the survey area

刻槽样品号	分析结果/10 ⁻⁶			边界品位/10 ⁻⁶
	Cu	Zn	Ag	
TC02-07	1449	162	—	Cu:2000
TC02-11	1017	215	—	Ag:40~50
TC02-13	1014	999	—	Zn:5000
TC02-15	1083	1856	—	
TC02-36	1210	133	—	
TC02-38	2236	124	—	
TC05-03	2210	47. 7	—	
TC05-18	1926	138	—	
TC05-19	2202	183	—	
TC06-01	2068	121	28. 48	
TC06-02	3324	195	49. 57	
TC06-03	2444	240	15. 59	

注:“—”代表无相关数据。

6 结论

1) 在该干旱荒漠区开展磁法、电法、化探方法,圈定了磁异常和激电异常,圈定的激电异常和化探异常浓集区都是该区勘查铜多金属矿的直接找矿标志。激电异常位于岩体与地层的接触部位,且位于控矿构造 F₁ 的附近,其中激电异常 J2 位于两个构造的交汇部位,成矿非常有利。

2) 通过可控源音频大地电磁测深探测到激电异常深部存在隐伏矿(化)体,深度为 300~400 m,说明可控源在干旱荒漠区能够取得较好的效果。

3) 在异常部位开展的探槽工程发现浅部矿体,多件样品的 Cu、Ag 含量已达到边界品位,说明使用的物化探方法组合有效。该区具有良好的找矿前景,可作为铜多金属找矿靶区,值得开展下一步相关工作。

致谢:感谢蔡永文,龚晶晶,苏磊在本文撰写过程中提供的帮助。

参考文献 (References):

[1] 刘涛涛,戴朝成,王新亮. 内蒙古中部乌拉山地区富铝片麻岩的地球化学特征和原岩建造[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(30): 1671-1815.

Liu T T, Dai C C, Wang X L. Geochemical characteristics and protolithformation of Al-rich gneisses in Wulashanarea, central Inner Mongolia[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(30): 1671-1815.

[2] 赵海超, 张金玲, 刘彩乐, 等. 青海省夏日哈木铜镍钴硫化物矿床找矿模型[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(36): 166-174.

Zhao H C, Zhang J L, Liu C L, et al. Copper-Nickel-Cobalt sulfide deposit prospecting model of Xiarihamu in Qinghai Province [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(36): 166-174.

[3] 陈化奇, 李永庆. 岩屑测量方法在干旱荒漠区的找矿效果——以贺兰山北段嘎拉士台白钨矿的发现为例[J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 55-63.

Chen H Q, Li Y Q. The prospecting effect of rock debris measurement method in arid desert area: Exemplified by the discovery of the Galasitai scheelite deposit in northern Helanmountain[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 55-63.

[4] 李立新, 李百祥. 物探在甘肃铅锌矿产找矿中的作用和效果[J]. 甘肃地质, 2014, 23(4): 63-68.

Li L X, Li B X. Role of geophysical prospecting played in prospecting Pb-Zn mineral resources in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 2014, 23(4): 63-68.

[5] 成秋明. 覆盖区矿产综合预测思路与方法[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2012, 37(6): 1109-1125.

Cheng Q M. Ideas and methods for mineral resources integrated prediction in covered areas[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(6): 1109-1125.

[6] 戚志鹏, 李貅, 钱建兵, 等. 电法联合解释在覆盖区矿产勘查中的应用[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2012, 37(6): 1199-1208.

Qi Z P, Li X, Qian J B, et al. Application of electrical joint interpretation method in mineral exploration of coverage areas[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(6): 1199-1208.

[7] 魏永强, 胡明考, 刘士凯, 等. 新型 AGRSS 航空伽马能谱测量系统在甘肃礼县地区铀及多金属矿产勘查中的应用效果[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2677-2686.

Wei Y Q, Hu M K, Liu S K, et al. Application effect of new airborne gamma ray spectrometry system on uranium and polymetallic deposit prospecting in Lixian of Gansu Province[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2677-2686.

[8] 龚胜平, 丁卫忠, 王明明, 等. 相位激发极化法在多宝山矿产远景调查中的应用效果[J]. 物探化探计算技术, 2013, 35(5): 524-529.

Gong S P, Ding W Z, Wang M M, et al. The application effect of phase-IP method in Duobaoshan perspective survey[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 35(5): 524-529.

[9] 黄桂珍. 荒漠戈壁覆盖区的矿产勘查技术探讨[J]. 资源环境与工程, 2014, 28(1): 69-73.

Huang G Z. Over view of new prospecting methods of gobi-overburden area[J]. Resources Environment & Engineering, 2014, 28(1): 69-73.

[10] 孟贵祥, 庄道洋, 王为江. 西部戈壁荒漠区大极距激电找矿试验分析[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 175-180.

Meng G X, Zhuang D Z, Wang W J. Experimental analysis of the long-space induced polarization method in the gobi-desert area of western China[J]. Acta Geoscientia Sinica. 2006, 27(2): 175-180.

[11] 张先年, 徐遂勤, 刘海军. 大功率激电中梯在某金矿勘查中的应用[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(26): 6511-6514.

Zhang X N, Xu S Q, Liu H J. Application of high-power IP intermediate gradient method in a prospecting project of an Au-ore district[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(26): 6511-6514.

[12] 谢学锦, 王学求. 深穿透地球化学新进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 225-238.

Xie X J, Wang X Q. Recent developments on deep-penetrating geochemistry[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 225-238.

[13] 牛洪斌, 李绪善, 徐家乐, 等. 物化探技术进步及其在甘肃地质勘查中的应用[J]. 甘肃地质, 2016, 25(3): 20-26.

Niu H B, Li X S, Xu J L, et al. The technical progress of geophysical and geochemical exploration and their applications in Gansu Province[J]. Gansu Geology, 2016, 25(3): 20-26.

[14] 李荣亮, 田建荣, 刘洋, 等. 综合物探方法在甘肃梧桐井铁铜多金属矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2017, 53(4): 755-

764.

Li R L, Tian J R, Liu Y, et al. Application of integrated geophysical methods to exploration in the Wutongjing Iron-Copper polymetallic deposit of Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(4): 755 – 764.

[15] 柳建新, 郭振威, 童孝忠, 等. 地面高精度磁法在新疆哈密地区铁矿勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(3): 432 – 438.

Liu J X, Guo Z W, Tong X Z, et al. Application of the ground high-precision magnetic method to magnetite survey in the Hamiarea, Xinjiang[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(3): 432 – 438.

[16] 李文明, 杨生飞, 全守村, 等. 内蒙古月牙山地区地球化学异常特征及找矿远景预测[J]. *矿产勘查*, 2017, 8(1): 101 – 111.

Li W M, Yang S F, Quan S C, et al. Characteristics of geochemical anomalies and prospecting prognosis of Yueyashan area, Inner Mongolia[J]. *Mineral Exploration*, 2017, 8(1): 101 – 111.

[17] 张江苏, 王滔, 毛艳丽, 等. 甘肃省南部矿集区水系沉积物测量地球化学特征及找矿预测[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(29): 121 – 133.

Zhang J S, Wang T, Mao Y L, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and metallogenic prognosis of southern ore-concentration area, Gansu Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(29): 121 – 133.

[18] 张波, 滕汉仁, 胥溢. 甘肃南部大水金矿集区磁异常特征及找矿分析[J]. *物探与化探*, 2018, 42(5): 917 – 924.

Zhang B, Teng H R, Xu Y. A discussion on the characteristics of magnetic anomaly and ore-prospecting orientation in Dashui gold concentration area of south Gansu Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(5): 917 – 924.

[19] Gong S P, Yang Y B, Lin P R, et al. Three-dimensional electrical exploration methods for the mapping of Polymetallic targets in Gansu Province, China[J]. *Geophysical Prospecting*, 2019, 67(7): 1929 – 1947.

[20] 龚胜平, 杨亚斌, 张光之, 等. 三维时间域激发极化法探测花牛山铅锌矿的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(18): 16 – 24.

Gong S P, Yang Y B, Zhang G Z, et al. Experimental study on 3D time-domain electromagnetic exploration in Huanishan Pd-Zn deposit[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(18): 16 – 24.

[21] 席明杰, 马生明, 胡树起, 等. 内蒙古准苏吉花铜钼矿区土壤热磁组分地球化学异常特征及意义[J]. *物探化探计算技术*, 2014, 10(1): 125 – 137.

Xi M J, Ma S M, Hu S Q, et al. Characteristics and significances of soil thermomagnetic components geochemical anomalies of the Zhunsujihua copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 10(1): 125 – 137.

[22] 马生明, 朱立新. 热液成因有色金属矿多维异常体系——以马头斑岩型钼铜矿为例[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(1): 134 – 144.

Ma S M, Zhu L X. Multi-dimensional anomaly system for hydrothermal nonferrous metal deposits: Taking the Matou porphyry molybdenum copper mine in Anhui province as an example[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(1): 134 – 144.

The application of integrated geophysical and geochemical methods to the prospecting of copper polymetallic deposits in the arid desert area

GONG Sheng-Ping^{1,2}, LU Gui-Fu¹, XI Ming-Jie¹, MA Sheng-Ming¹, SU Wen-Li¹

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China; 2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to study the combination of effective geophysical and geochemical prospecting methods in mineral inspection work in arid desert areas and to achieve regional mineral prospecting breakthroughs, the authors conducted the mineral survey work in an arid desert area in the Heiyingshan area of Inner Mongolia. Geophysical and geochemical methods were used in search for copper polymetallic deposits. Geological survey, high-power IP, high-precision magnetic survey at a scale of 1 : 10 000 and thermomagnetic component soil measurement (1 : 50 000) were carried out in the survey area. IP anomalies and magnetic anomalies were delineated, and characteristics of multi-element combination were revealed after data processing. The controllable source audio magnetotelluric sounding profiles were arranged in the locations of the IP anomalies and the anomaly concentration places of the elements to determine the downward distribution of the two high conductivity anomalies. The trench reveals that strong silicification, skarnization and malachite mineralization occur at the contact zone between the albite-actinolite-schist mixed with metamorphic quartz sandstone in the Gongpoquan Formation and the marble. The content of Cu and Ag in the samples reaches the boundarygrade. The ore-search prospects in the survey area are good and further work should be carried out.

Key words: arid desert area; integrated method; polymetallic deposit; Inner Mongolia