

doi: 10.11720/wtyht.2019.0013

杨帆 郝志红 张素荣 等.土壤铁锰氧化物结合态元素提取技术在内蒙古新巴尔虎右旗头道井铜金矿地球化学勘查中的应用试验[J].物探与化探,2019,43(4):692-701.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0013

Yang F ,Hao Z H ,Zhang S R ,et al.A geochemical ore-prospecting experiment by extracting Fe-Mn oxides bound in soil samples in the Toudaojing Cu-Au deposit in Xin Barag Right Banner , Inner Mongolia [J].Geophysical and Geochemical Exploration ,2019 ,43(4) : 692-701.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0013

土壤铁锰氧化物结合态元素提取技术在内蒙古 新巴尔虎右旗头道井铜金矿地球化学 勘查中的应用试验

杨帆^{1 2 3 4} 郝志红^{2 3} 张素荣⁵ 徐进力^{2 3 4} 王京彬¹ ,
成杭新^{2 3} 胡瑞忠⁴ 张舜尧^{2 3}

(1.北京矿产地质研究院,北京 100012; 2.中国地质调查局 土地质量地球化学调查评价研究中心,河北 廊坊 065000; 3.中国地质科学院 地球表层碳—汞地球化学循环重点实验室,河北 廊坊 065000; 4.中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室,贵州 贵阳 550002; 5.天津地质矿产研究所,天津 300170)

摘要: 针对常规地球化学方法在水系不发育而风成砂较发育的内蒙古丘陵草原覆盖区找矿效果均不理想的问题,以新巴尔虎右旗头道井铜金矿为试验研究区,开展土壤样品中的铁锰氧化物结合态地球化学找矿试验。采用等离子体质谱法、原子荧光光谱法和无火焰原子吸收光谱法配套测试土壤铁锰氧化物结合态的元素含量,利用面积性试验对比矿体上方和外围土壤铁锰氧化物结合态的元素异常特征,圈定并发现了新的隐伏金矿体。结果表明,本次土壤铁锰氧化物结合态元素分析测试方法的精确度和准确度满足地球化学找矿的需求;土壤铁锰氧化物结合态可有效圈定找矿靶区,寻找隐伏金矿。本试验是一项成功的找矿案例,可为该类丘陵草原覆盖区开展地球化学找矿活动提供借鉴。

关键词: 覆盖区;地球化学找矿;铁锰氧化物结合态;金矿;隐伏矿

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2019)04-0692-10

0 引言

铁锰氧化物大量存在于自然环境中^[1-6],广泛分布在岩石^[3-5]和水系沉积物表面^[6-9]、水体^[10-11]和土壤中^[12-23],因其比表面积大^[12-13]、表面电荷多^[16]、活性强^[19-20]、电荷零点(PZC)低,对周围环境中的元素吸附解吸^[12-16]、迁移转化^[17]、氧化还原^[18]、有机无机络合^[18]等具有十分重要的作用和意义。铁锰氧

化物主要矿物为褐铁矿和硬锰矿,并伴生有 Au、Ag、Cu、Pb 等元素,因而,可以用于某些金属矿产勘查^[1-2,13,15,17,20]。

针对水系沉积物测量和土壤测量在内蒙古东部水系不发育而风成砂较发育的丘陵草原覆盖区找矿效果均不理想的情况下,笔者选择了位于该类景观区内的新巴尔虎右旗头道井铜金矿研究区开展土壤铁锰氧化物结合态找矿试验。采用等离子体质谱法、原子荧光光谱法和无火焰原子吸收光谱法配套

收稿日期: 2019-01-07; 修回日期: 2019-04-13

基金项目: 中国地质调查局项目“全国土地质量综合监测与评价”(DD20190527); 中国地质调查局项目“乌蒙山区土地质量地球化学调查”(DD20190522); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(AS2015J03)。

作者简介: 杨帆(1983-)男,高级工程师,博士研究生,主要从事勘查地球化学及环境地球化学相关基础理论研究和调查评价工作。Email: yangfan@igge.cn

通讯作者: 成杭新(1964-)男,研究员,博士生导师,中国地质调查局土地地球化学调查工程首席科学家,主要从事勘查地球化学与生态地球化学研究工作。Email: hangxin@vip.sina.com

测试土壤铁锰氧化物结合态 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Mo、Bi。通过对比矿体上方和外围土壤铁锰氧化物结合态的元素异常特征, 优选具有成矿潜力的异常进行钻探验证, 确定方法的有效性。本试验可为该类丘陵草原覆盖区实现找矿突破和开展地球化学找矿活动提供借鉴。

1 试验区概况

1.1 自然地理概况

头道井铜金矿试验区行政区划隶属内蒙古自治区呼伦贝尔市新巴尔虎右旗管辖, 北距满州里市 18 km, 与满州里市有草原简易公路相通, 交通较为便利(图 1)。

试验区属于中温带亚干旱气候大区, 为大陆性温带草原气候, 二级景观是半干旱荒漠区, 次级景观为丘陵草原区。年平均气温 0 °C, 冰冻期为 9 月底至翌年 5 月, 年降雨量小于 300 mm。区内地形平坦, 海拔高度 650~860 m, 相对高差不大, 水系不发育, 除山坡地带基岩出露较好外, 多半为覆盖区, 局部地段风成砂较发育, 且厚度较大^[24]。

1.2 地质概况

区域上, 试验区位于西伯利亚板块东南大陆边缘额尔古纳非火山型被动陆缘中段, 以断裂构造为主, 其中 NE-SW 向得尔布干大断裂最为突出(图 1),

NW-SE 向的横断裂规模小但较多, 两者构成的网格状断裂系统相互作用, 在满洲里—新巴尔虎右旗一带形成一系列 NE 向、NW 向构造隆起、断陷盆地和火山穹隆相间分布的构造格局。该构造区以得尔布干超壳断裂为界可延至俄罗斯—蒙古国境内, 是中国、俄罗斯、蒙古国之间的一个重要的成矿带。其构造基底是元古宙—古生代变质地体和古生代侵入杂岩体, 盖层为侏罗—白垩系火山岩及陆相沉积岩。区内矿产资源丰富, 主要以铜、铅、锌、银多金属为主^[25]。

试验区震旦系、侏罗系和第四系发育。震旦系额尔古纳河组为深灰色、白色—灰白色白云岩、大理岩夹绢云母粉砂质板岩。中侏罗统塔木兰沟组为灰黑色安山质玄武岩, 上侏罗统满克头鄂博组为灰色流纹岩、含角砾岩屑凝灰岩, 上侏罗统玛尼吐组为灰色、灰紫色安山岩、黑云母安山岩, 满克头鄂博组流纹岩、含角砾凝灰岩呈小面积分布于玛尼吐组中。第四系为残坡积、冲积、洪积物(图 2)。

试验区岩浆岩发育。侏罗纪花岗岩为中细粒二长花岗岩、黑云母花岗岩, 多呈小岩株。脉岩有花岗斑岩脉、花岗岩脉、闪长玢岩脉、辉绿岩脉和花岗闪长斑岩脉, 其走向多为 NE 向和 NNE 向, 个别为 EW 向。在花岗闪长斑岩和额尔古纳河组接触带部位见硅化、矽卡岩化和铜、金矿化。

试验区内断裂发育, 主要断裂为 NE 向、NW 向和 NNE 向^[26]。

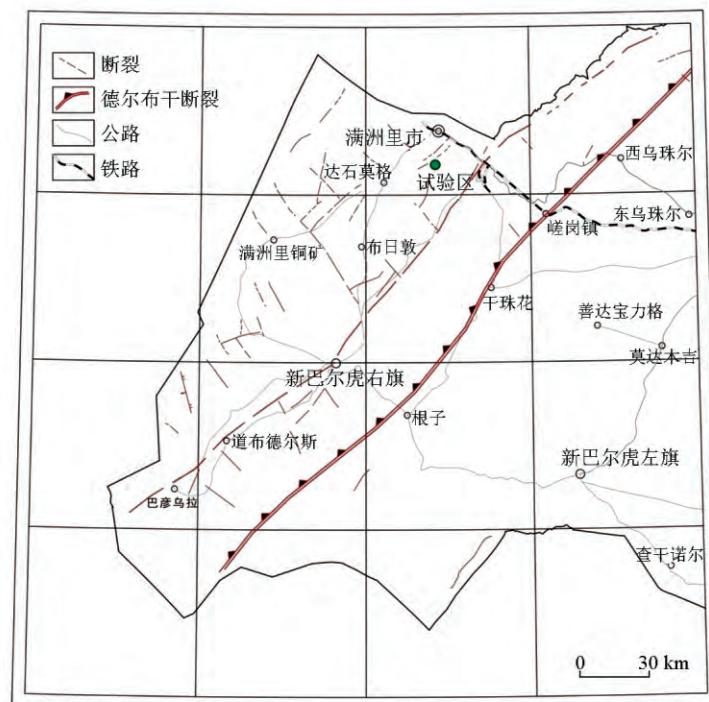


图 1 头道井铜金矿区交通位置及区域构造简图

Fig.1 Schematic map of traffic location and regional structure in the Toudaojing Cu-Au deposit

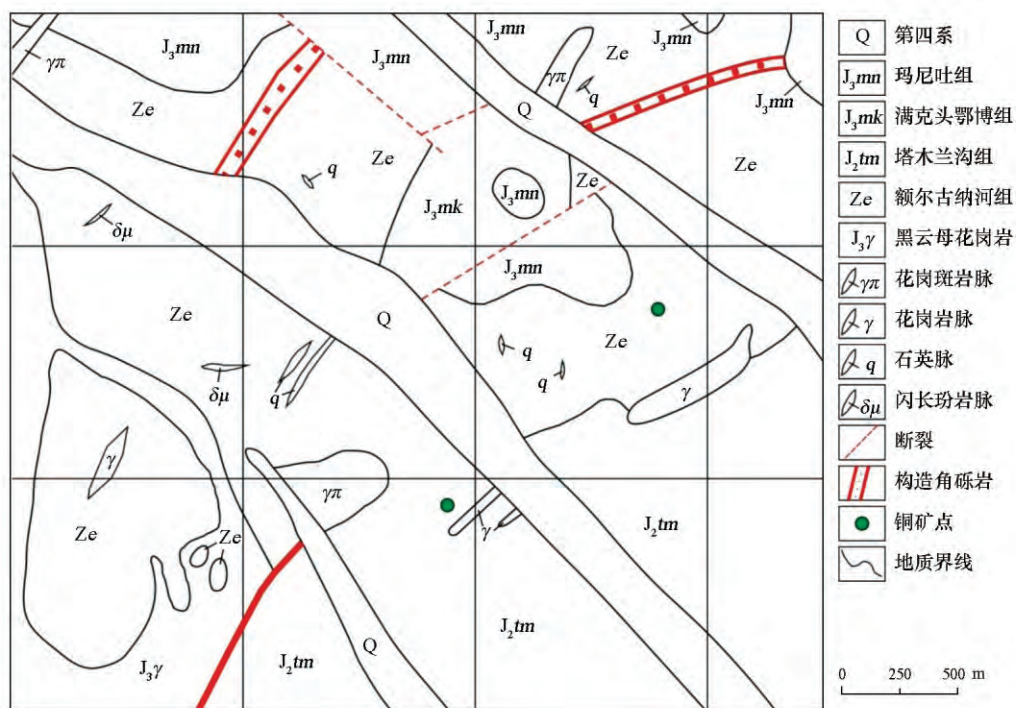


图 2 头道井铜金矿地质图

Fig.2 Geological map of the Toudaojing Cu-Au deposit

2 样品采集与分析测试

2.1 样品采集

试验区面积约 6.43 km²，采样测线为 SN 向，按照 100 m (线距) × 40 m (点距) 网度采集样品，共计采集 1 700 件样品。为避开采矿导致的潜在污染，采集 40 ~ 50 cm 深穿过腐殖层的土壤；基岩区样品采集 B 层底部的土壤；矿化蚀变带采集岩石碎屑^[17]。

2.2 分析测试

样品自然干燥后，全部过 2 mm (- 10 目) 样品筛，称取 200 g 送中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析测试研究中心进行样品测试，采用七步提取形态成分法，提取土壤形态中铁锰氧化物结合态的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Mo、Bi。

2.2.1 主要设备

除分析仪器外，采用的主要设备有：调速多用往复振荡器；离心机，TDL-5 最大转速 5 000 r/min，220 V 50 Hz (上海安亭科学仪器厂)；电热恒温水浴锅；等离子发射光谱仪高盐雾化器；250 mL 带盖聚乙烯烧杯；50 mL 带盖聚乙烯离心管。

2.2.2 主要试剂

1.0 mol/L 的氯化镁溶液：称取 508 g MgCl₂ · 6H₂O，用去离子水定容至 2 500 mL，保存于塑料桶

中，用 10% 的 NaOH (约 20 滴) 调 pH = 7.0 ± 0.2。

1.0 mol/L 的醋酸钠：称取 340 g CH₃COONa · 3H₂O，用去离子水定容至 2 500 mL，保存于塑料桶中，用 99% 的 CH₃COOH (约 60 mL) 调 pH = 5.0 ± 0.2。

0.1 mol/L 的焦磷酸钠：称取 111.5 g Na₄P₂O₇ · 10H₂O，用去离子水定容至 2 500 mL，保存于塑料桶中，用 1+1 的 HNO₃ (约 0.4 mL) 调 pH = 10.0 ± 0.2。

0.25 mol/L 的盐酸羟胺—盐酸混合液：称取 43.4 g HONH₃Cl，加 (1+1) HCl 104 mL，用去离子水定容至 2 500 mL，保存于塑料桶中。

过氧化氢 φ (H₂O₂) = 30%，pH = 2.0 ± 0.2 (用稀 HNO₃ 和稀 NaOH 调) (1+1 HNO₃ 约 5 滴/500 mL)。

3.2 mol/L 的醋酸胺—硝酸混合液：称取 616.6 g CH₃COONH₄，加 500 mL HNO₃，用去离子水定容至 2 500 mL，保存于塑料桶中。

王水 (HCl+HNO₃+H₂O = 3+1+2)。

2.2.3 顺序提取及溶液制备

七步法顺序提取依次是：水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态。铁锰氧化物结合态提取是七步法顺序提取中的第五步，具体步骤如下：

第一步：称取样品 5.0000 g 于 250 mL 聚乙烯烧杯中，加入 50 mL 去离子水 (煮沸、冷却、调 pH = 7) 摇匀，盖上盖子。于温度 (25 ± 2) °C、振速为 200 次/

min 的振荡器上振荡 2 h。取下,除去盖子,在离心机上于 4 000 r/min 离心 20 min。将清液倒出,留下残渣(1)。

第二步:向残渣(1)中加 50 mL 氯化镁溶液溶液,摇匀,盖上盖子。于温度(25±2)℃、振速为 200 次/min 的振荡器上振荡 2 h。取下,除去盖子,在离心机上于 4 000 r/min 离心 20 min。将清液倒出后,向残渣中加入约 200 mL 水洗沉淀后,于离心机上 4 000 r/min 离心 10 min,弃去水相,留下残渣(2)。

第三步:向残渣(2)中加 50.0 mL 醋酸钠溶液摇匀,盖上盖子,于温度(25±2)℃、振速为 200 次/min 的振荡器上振荡 5 h。取下,除去盖子,在离心机上于 4 000 r/min 离心 20 min。将清液倒出后,向残渣中加入约 200 mL 水洗沉淀后,于离心机上 4 000 r/min 离心 10 min,弃去水相,留下残渣(3)。

第四步:向残渣(3)中加入 100 mL 焦磷酸钠溶液,摇匀,盖上盖子,于温度(25±2)℃、振速为 200 次/min 的振荡器上振荡 3 h。取下,除去盖子,在离心机上于 4 000 r/min 离心 20 min。将清液倒出后,向残渣中加入约 200 mL 水洗沉淀后,于离心机上 4 000 r/min 离心 10 min,弃去水相,留下残渣(4)。

第五步:向残渣(4)中加入 100 mL 盐酸羟胺溶液,摇匀,盖上盖子,于温度(25±2)℃、振速为 200 次/min 的振荡器上振荡 6 h。取下,除去盖子,在离心机上于 4 000 r/min 离心 20 min。将清液倒入 100 mL 比色管中。

分取 1 mL 清液定容至 10 mL,摇匀,用于等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Ag、Bi、Cu、Mo、Pb、Sb、Zn。分取 20 mL 清液于 25 mL 比色管中,加 5 mL 浓 HCl,摇匀,用于原子荧光光谱法(AFS)测定 As、Hg。其

余溶液用王水消解后,加泡塑吸附,在振速为 200 次/min 的振荡器上振荡 1 h,硫脲解脱,用于无火焰原子吸收光谱法(GF-AAS)测定 Au。剩余溶液转入玻璃三角瓶中,加入 1+1 王水 20 mL,在 200℃左右的电热板上加热分解,待溶液剩余 10 mL 时取下冷却至室温,加入 FeCl₃ 溶液 1 mL,加入去离子水约 100 mL,加入一块聚氨酯泡塑后置于振荡器上振荡 1 h,取出泡塑洗净,用 5 mL 硫脲溶液在沸水浴中解脱,解脱液用于石墨炉原子吸收光谱法(GF-AAS)测定 Au。

需要说明的是,本文是根据资助项目的试验方案设计,按照循序提取技术逐步提取土壤样品中的铁锰氧化物结合态,并测试其元素含量。因此没有采用简化步骤的方式直接提取铁锰氧化物结合态。

3 分析质量

本项试验分析了样品铁锰氧化物结合态中的 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Mo、Bi 等 10 项指标。分析质量通过检测标准物质和重复样来检验^[12-13, 17, 27-31]。标准物质选用 GBW07441(GSF-1)、GBW07442(GSF-2)、GBW07445(GSF-5) 重复样品共 40 件。

3.1 标准物质检测

本试验测试的 10 项指标中,Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Mo 等 7 项指标具有相应的标准物质定值,Au、Ag、Bi 等 3 项指标无相应的标准物质定值。因此,本文检测了上述标准物质 Cu、Pb、Zn、As、Sb、Hg、Mo 等 7 项指标,计算了其精密度和准确度(表 1)。结果显示,本次试验采用的方法精密度和准确度均较好,样品分析质量可靠。

表 1 方法准确度和精密度

Table 1 Accuracy and precision tests of the method

标准物质	参数	Cu	Mo	Pb	Zn	As	Hg	Sb
GBW07441 GSF-1	平均值	3.5	0.024	15	6.3	1.6	2.1	0.012
	标准差	0.8	0.005	3	1.3	0.4	0.5	0.003
	精密度($D_{r,p}$)/%	22.8	20.082	19	20.1	24.4	23.1	27.660
	标准推荐值	3.5	0.025	16	6.2	1.5	2	0.011
	准确度(ΔgC)	0.001	-0.012	-0.026	0.010	0.017	0.014	0.022
GBW07442 GSF-2	平均值	12.7	0.039	17.7	29.9	1.3	1.3	0.020
	标准差	2.6	0.008	3.6	5.7	0.3	0.3	0.005
	精密度($D_{r,p}$)/%	20.5	21.144	20.3	19.2	19.9	22.1	22.344
	标准推荐值	11.6	0.041	18.2	30	1.2	1.2	0.02
	准确度(ΔgC)	0.038	-0.022	-0.012	-0.001	0.029	0.027	0.009
GBW07443 GSF-3	平均值	12.4	0.045	284	76.9	96.8	154.3	0.454
	标准差	2.5	0.007	58	11.7	18.5	32.0	0.102
	精密度($D_{r,p}$)/%	20.1	16.426	21	15.2	19.1	20.8	22.424
	标准推荐值	12.4	0.036	280	78	100	170	0.48
	准确度(ΔgC)	-0.001	0.097	0.006	-0.006	-0.014	-0.042	-0.024

注: Hg 含量单位为 10⁻⁹, 其余元素为 10⁻⁶

3.2 重复样

重复样分析质量采用两次测试结果的相对误差 ($E_r\%$) 来检测。相对误差 ($E_r\%$) 为两次测试结果的差除以两次测试结果的和的绝对值的 2 倍。计算公式为:

$$E_r\% = \frac{2 | C_1 - C_2 |}{(C_1 + C_2)} \times 100\%$$

式中 C_1 、 C_2 分别为两次测定的浓度值。

统计采集的 40 件重复样两次测试结果相对误差的最小值、最大值。结果显示,重复样测定的 10 项指标相对误差均小于 20%(表 2),满足该项试验的要求。

表 2 重复样检验相对误差

Table 2 Relative error of repeated sample tests

元素	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Hg	Mo	Bi
最小值	16.29	9.18	7.13	6.53	6.14	10.66	12.35	8.51	11.52	13.61
最大值	19.97	17.63	14.61	12.82	13.89	18.15	19.57	16.37	17.13	19.35

4 结果与讨论

4.1 数据处理与图件编制

对每个元素的原始数据进行了正态分布检验后,统计各元素数据的平均值、标准离差等参数,并采用迭代剔除法,剔除原始数据中大于平均值 ± 3 倍标准离差的数值,直到新的数据集中所有数据均在其平均值 ± 3 倍标准离差范围内^[17,33-34]。表 3 统计了新

数据集中各元素的最大值(X_{max})、最小值(X_{min})、平均值(X_{mean})、标准离差(S)和异常下限(T),其中异常下限为平均值加 2 倍标准离差^[35-37]。

为了图件的美观简洁和有效反应试验区实际的元素地球化学分布,成图时根据试验区以往地球化学资料,对上述计算得出的异常下限进行了微调,采用表 3 中的 $T_{成图}$ 、 $2T_{成图}$ 、 $4T_{成图}$ 作为地球化学异常分级,利用 Surfer 软件编制了前述各元素的地球化学异常图。

表 3 铁锰氧化物结合态中元素的特征值

Table 3 Characteristic values of elements in Fe-Mn oxides bound

特征值	Au	Ag	As	Bi	Cu	Hg	Mo	Pb	Sb	Zn
最小值	0.001	0.1	12.5	0.2	0.03	0.01	1.7	0.03	1.05	0.01
最大值	2.681	12827	11078	678	8271	338	623	98.8	5637	2074
平均值	0.095	33.22	279.1	27.47	2.88	0.19	16.94	6.19	8.69	6.45
标准离差	0.045	14.32	110.1	15.34	1.51	0.05	6.95	2.78	2.8	2.8
异常下限	0.185	61.8	499.3	58.2	5.9	0.29	30.8	11.8	14.3	12.1
本文所用异常下限($T_{成图}$)	0.15	60	400	50	6	0.3	30	12	15	12

注: Cu、Pb、Zn 含量单位为 10^{-6} , 其余元素为 10^{-9}

4.2 面积性测量元素地球化学异常特征

本次试验圈定了试验区土壤铁锰氧化物结合态 Au、Sb、As 为主的地球化学异常组合,伴有 Cu、Ag、Hg、Mo、Bi 等指标的地球化学异常(图 3)。

土壤铁锰氧化物结合态 Au 异常具有成带分布、局部富集的特点。形态多呈不规则状或串珠状,具有 6 个明显的浓集中心。根据铁锰氧化物结合态 Au 异常成带分布的特点,结合区域断裂展布的方向,可以推断出 3 条断裂,其中一条是 NE 向,另外两条是 NW 向。铁锰氧化物结合态 Au 在断裂上呈串珠状分布。同时,两个已知铜多金属矿点位于推断断裂上(图 3)。

Sb 异常分布范围和强度略大于 Au 异常,多呈团块状分布,与 Au 异常吻合。Sb 异常在 NE 向、NW 向推测断裂上均有发育,且成带分布,发育三级异常,具有多个浓集中心(图 4)。

As 异常与 Au 异常相似,多呈不规则状分布在 Sb 异常的范围内,浓集中心空间位置基本重叠(图 5)。

Cu、Ag、Hg、Mo、Bi 等指标的地球化学异常主要分布在 Au、Sb、As 的异常范围内,异常面积较小,其异常图不在文中一一展示,主要分布特征如下: Cu、Ag 异常主要与已知铜多金属矿点位置吻合,异常强度大,但面积较小。Mo 异常零星分布在试验区,与 Cu 异常和已知铜多金属矿化点空间分布无明显对应关系。Hg 异常具有 5 处明显的浓集中心,其中 1 处位于已知的铜多金属矿上方,其他几处浓集中心多位于 Au 异常的外围。Zn、Bi 在北侧已知铜多金属矿处有明显的浓集中心,空间位置也比较吻合。研究区几乎无明显 Pb 异常,仅在研究区西北角 Au 的浓集中心处出现了 Pb 异常。

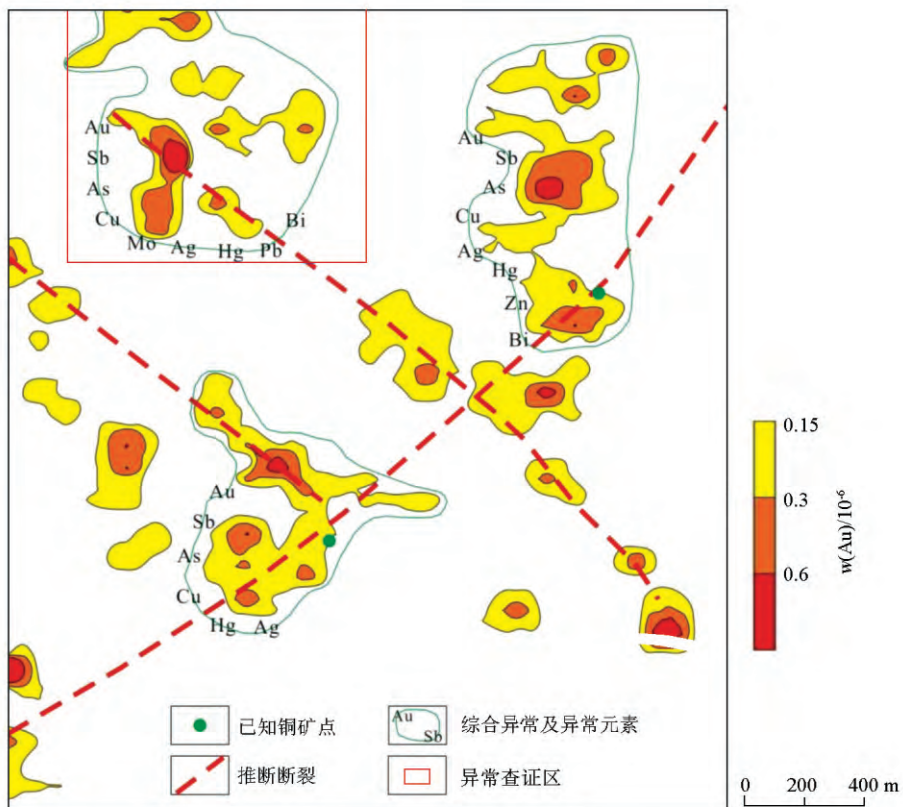


图 3 试验区金元素及综合异常分布

Fig.3 Au and comprehensive geochemical anomaly map of the test area

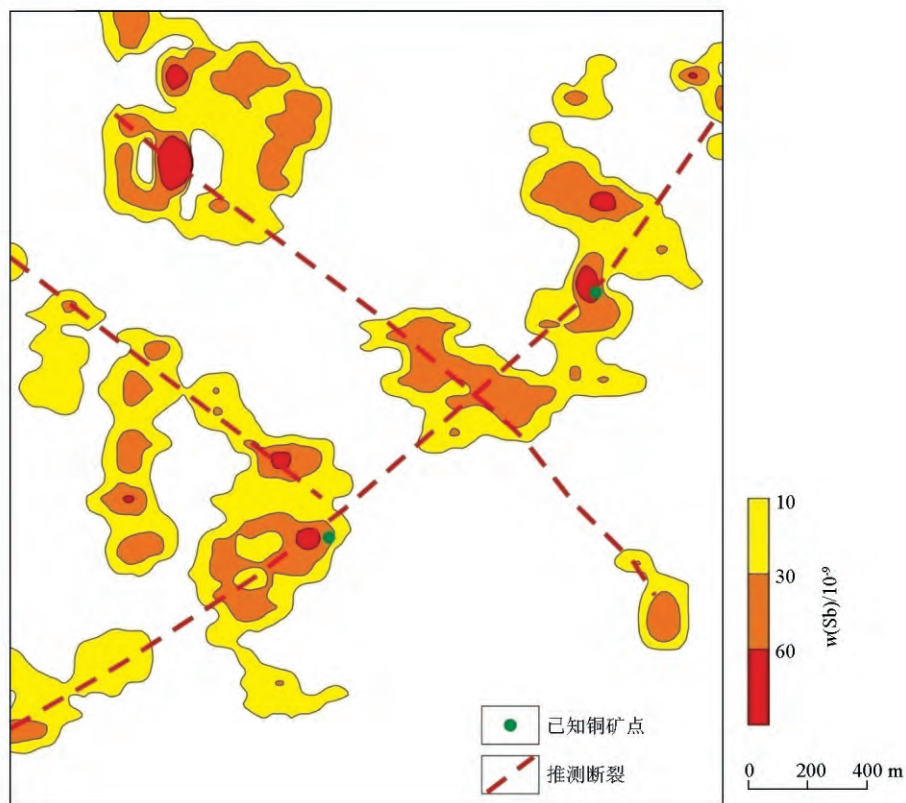


图 4 试验区锑元素异常分布

Fig.4 Sb geochemical anomaly map of the test area

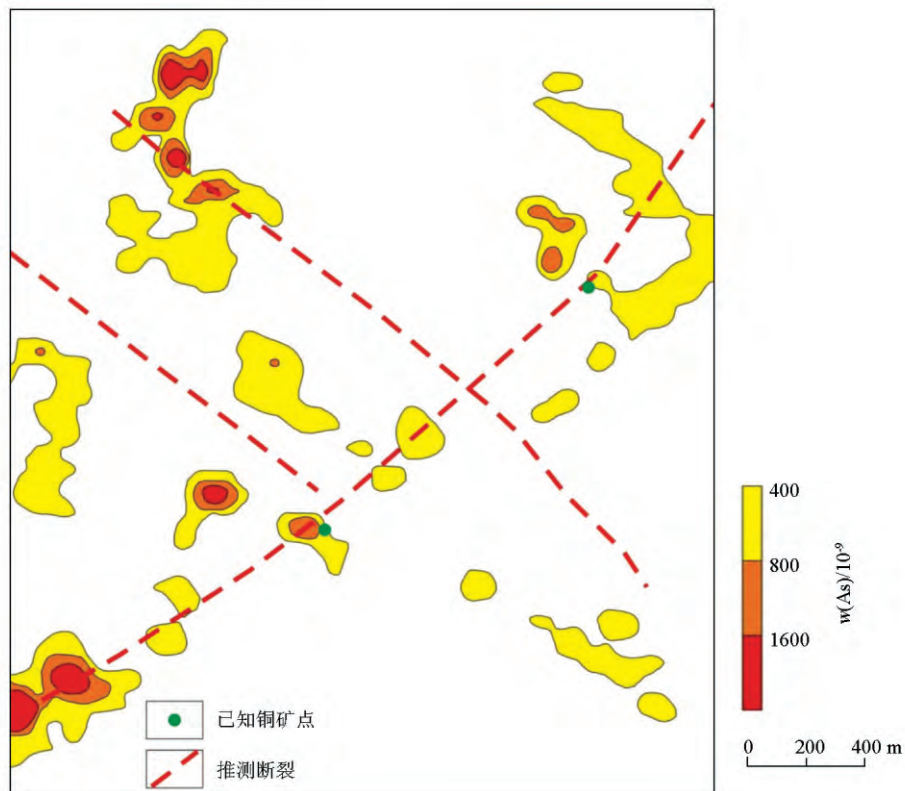


图 5 试验区砷元素异常分布
Fig.5 As geochemical anomaly map of the test area

4.3 激电与钻探验证

为了验证试验区土壤铁锰氧化物结合态地球化学异常,在试验区西北角的综合异常范围内(见图3)开展激电验证工作,并布置了3个验证钻孔(图6)其中钻孔 Zk2 和 Zk3 分别位于 Zk1 的 25° 和 205° 方位 40 m 处。激电验证结果显示,该地球化学综合异常区存在激电异常,主要对应石英斑岩、砂卡岩、花岗岩脉、额尔古纳河组大理岩等地质体。

钻探验证结果显示,钻孔 Zk1 中,孔口至孔深 52.05 m 为弱蚀变大理岩;52.05~103.15 m 为蚀变大理岩,细脉浸染状黄铁矿化断续分布于其中;103.15~138.95 m 为灰色大理岩,138.15~150.14 m 为大理岩蚀变较强,见硅化、黄铁矿化、高岭土化;147.45~150.14 m 见灰绿色辉石阳起石砂卡岩,连续采集 3 件样品,品位分析结果表明样品中 Au 分别为 10.26 g/t、0.92 g/t 和 3.27 g/t。金矿体斜厚 2.69 m,产状 205°∠81°,平均品位 5.27 g/t。钻孔 Zk3 孔深 283.27 m 在 264.85~265.85 m 见金矿体,Au 品位 2.93 g/t,表明金矿体向南有一定的延伸。钻孔 Zk2 孔深 275.55 m 在 76.71~77.71 m 见铜矿体,其中 Cu 品位 1.45%,Ag 品位 189 g/t。

综上,土壤铁锰氧化物结合态元素异常可有效

地圈定找矿靶区,直接指导隐伏金矿体和铜矿体的勘查发现。

5 结语

1) 本次土壤铁锰氧化物结合态元素分析测试方法的精确度和准确度满足地球化学找矿的需求。

2) 内蒙古新巴尔虎右旗头道井试验结果表明,土壤铁锰氧化物结合态可有效圈定找矿靶区,寻找隐伏金矿。

3) 本试验是一个在丘陵草原覆盖区开展地球化学找矿的成功案例,可为相似地区地球化学找矿工作提供借鉴。

参考文献(References):

[1] 施俊法,唐金荣,周平,等. 隐伏矿勘查经验与启示——从《信息找矿战略与勘查百例》谈起[J]. 地质通报,2008,27(4): 433-450.
Shi J F, Tang J R, Zhou P, et al. Experience in exploration for buried deposits and its implications—discussed from Information-based Mineral Exploration Strategy and One Hundred Mineral Exploration Case Histories [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(4): 433-450.

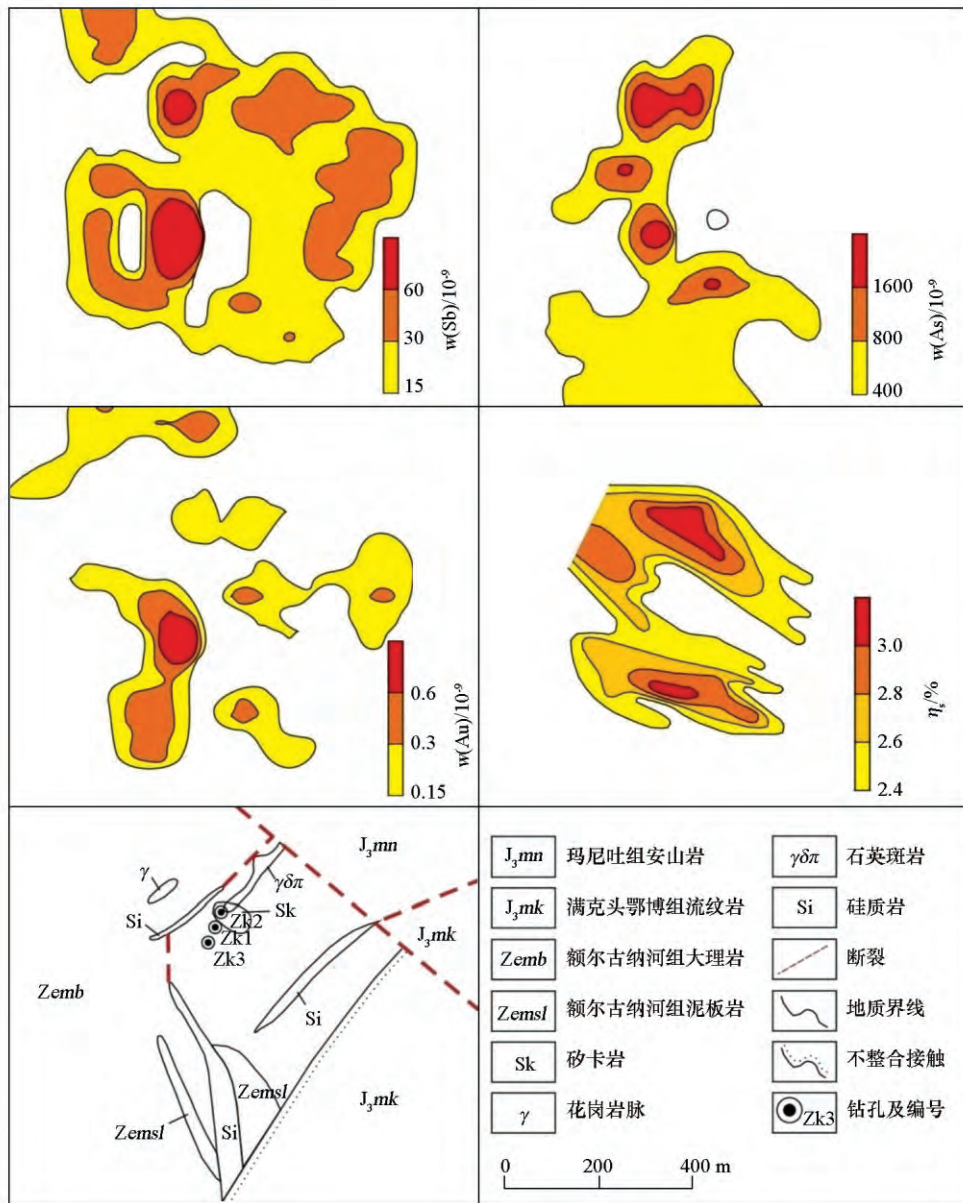


图 6 试验区物化探综合异常剖析

Fig.6 Comprehensive anomaly analysis map of geophysical and geochemical exploration in the test area

- [2] 杨少平,弓秋丽,文志刚,等. 地球化学勘查新技术应用研究[J]. 地学学报, 2011, 85(11): 1844-1877.
Yang S P, Gong Q L, Wen Z G, et al. Study on application of new technologies for geochemistry exploration [J]. Acta Geologica sinica, 2011, 85(11): 1844-1877.
- [3] 白金峰,卢荫麻. 若干深穿透地球化学方法在智利 Spence 隐伏斑岩铜矿床上的应用试验[J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 610-616.
Bai J F, Lu Y X. The experimental application of some deep-penetrating geochemical methods over the Spence concealed porphyry copper deposit in Chile [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 610-616.
- [4] 卢荫麻,白金峰. 金的相态分析[J]. 岩矿测试, 2000, 19(2): 81-86.
Lu Y X, Bai J F. Phase Analysis for Gold [J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, 19(2): 81-86.
- [5] 白金峰,卢荫麻,文雪琴. 金的活动态分析方法及其应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(5): 410-413.
Bai J F, Lu Y X, Wen X J. The analytical method for mobile forms of gold and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(5): 410-413.
- [6] 赵兴敏,花修艺,付尧,等. Pb, Cu 和 Zn 在自然水体生物膜中铁/锰氧化物等组分上的富集规律[J]. 高等学校化学学报, 2006, 27(9): 1645-1649.
Zhao X M, Hua X Y, Fu Y, et al. Enrichment of Pb, Cu and Zn on ferromanganese oxides from surface coatings collected in natural water [J]. Chemical Journal of Chinese universities, 2006, 27(9): 1645-1649.

- [7] 李鱼,杜显元,王晓丽,等. 表层沉积物(生物膜)及其各组分对自然水体中 Cu,Zn 的富集[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 79-82.
Li Y, Du X Y, Wang X L, et al. Enrichment of Cu and Zn in surficial sediments (surface coatings) and their main components in natural waters [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 79-82.
- [8] 李云飞,何江,吕昌伟,等. 达里诺尔湖表层沉积物中 Hg、As 的形态分布及释放特性[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2228-2233.
Li Y F, He J, Lv C W, et al. Fractions and releases of mercury and arsenic in sediments of Dalinuoer lake, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(11): 2228-2233.
- [9] 胡忠贤,于援帮. 森林沼泽区从区域到矿区有效寻找隐伏矿的地球化学方法组合[J]. 物探与化探, 2009, 33(1): 35-37, 42.
Hu Z X, Yu Y B. the combination of effective geochemical methods in search for concealed ore deposits from region to ore district in the Forest-Swamp area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009, 33(1): 35-37, 42.
- [10] 童蕾,曾梦玲,李民敬,等. 铁锰氧化物对地下水环境中金霉素降解[J]. 环境化学, 2016, 35(5): 917-924.
Tong L, Zeng M L, Li M J, et al. Degradation of chlorotetracycline by iron and manganese oxides under simulated groundwater environment [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(5): 917-924.
- [11] Dong D, Derry L A, Lion L W. Pb scavenging from a freshwater lake by Mn oxides in heterogeneous surface coating materials [J]. Water Research, 2003, 37(7): 1662-1666.
- [12] Huang L, Hong J, Tan W F, et al. Characteristics of micromorphology and element distribution of iron-manganese cutans in typical soils of subtropical china [J]. Geoderma, 2008, 146(1): 40-47.
- [13] 王学求,张必敏,刘雪敏. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 101-112.
Wang X Q, Zhang B M, Liu X M. Nanogeochemistry: Deep penetrating geochemical exploration through cover [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 101-112.
- [14] 曹建劲. 隐伏金属矿床上升气流微粒特征、形成及迁移[J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 113-119.
Cao J X. Characteristics, formation and migration of the particles carried by ascending gas flow from the concealed metal deposits [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(3): 113-119.
- [15] 赵波,龚敏,熊燃,等. 湿润中低山景观条件下土壤金属活动态找矿试验[J]. 物探与化探, 2012, 36(6): 902-906.
Zhao B, Gong M, Xiong R, et al. Soil metallic active prospecting test under the condition of humid low-mountain landscape [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(6): 902-906.
- [16] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(2): 750-759.
- [17] Yang F, Xie S Y, Emmanuel John M. Carranza, et al. Vertical Distribution and speciation of Major Ore-forming Elements in the Semiarid System above the concealed Baiyinnuoer Pb-Zn Deposit in Inner Mongolia, China [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2019, 19: 46-57, <https://doi.org/10.1144/geochem2017-075>.
- [18] 杨晓燕,侯青叶,杨忠芳,等. 成都经济区黄壤土壤剖面 Pb 形态分布特征及其影响因素[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 966-974.
Yang X Y, Hou Q Y, Yang Z F, et al. Form distribution and the influencing factors of Pb in Yellow soil profiles from Chengdu economic area, China [J]. Geoscience, 2008, 22(6): 966-974.
- [19] 陈希泉,罗先熔,文雪琴. 内蒙古额尔古纳湾拉林金矿区金属元素活动态测量法找矿试验[J]. 矿产与地质, 2006, 20(4): 475-478.
Chen X Q, Luo X R, Wen X Q. Experiment of applying active phase metal elements for ore prospecting in Hulalin gold ore field of Eerguna, Inner Mongolia [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(4): 475-478.
- [20] 谷雪,陆继龙,李宏姣,等. 内蒙古拜仁达坝铅锌矿集区土壤中成矿元素分布及其赋存形态研究[J]. 世界地质, 2016, 35(1): 100-107.
Gu X, Lu J L, Li H J, et al. Distributions of ore-forming elements and their occurrence modes in soil of Bairendaba lead and zinc ore-concentrated area, Inner Mongolia [J]. Global Geology, 2016, 35(1): 100-107.
- [21] 彭省临,邵拥军,张建东. 金属矿山隐伏矿找矿预测理论与方法[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 538-543.
Peng S L, Shao Y J, Zhang J D. Prospecting prediction theory and method about concealed ore-deposit in metal mine [J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 538-543.
- [22] 王戈,孙忠军,吴荣高,等. 得耳布尔铅锌矿土壤表生地球化学特征[J]. 物探与化探, 2010, 34(1): 30-33.
Wang G, Sun Z J, Wu R Z, et al. Surface geochemistry of soil in the Deerbuer Pb-Zn deposit [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 30-33.
- [23] Mann A W. Strong versus weak digestions: ligand-based soil extraction geochemistry [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2010, 10(1): 17-26.
- [24] 李孝红,肖成东,柴社立,等. 内蒙古新巴尔虎右旗化探新技术研究与应用[J]. 物探与化探, 2008, 32(5): 514-518.
Li X H, Xiao C D, Chai S L, et al. The study and application of new geochemical exploration techniques in Xin Barag Right Banner, Inner Mongolia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2008, 32(5): 514-518.
- [25] 秦克章,田中亮史,李伟实,等. 满洲里地区印支期花岗岩 Rb-Sr 等时线年代学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(3): 235-240.
Qin K Z, Ryoji Tanaka, Li W S, et al. The discovery of Indo-Sinian granites in Manzhouli area: Evidence from Rb-Sr isochrons [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 1998, 17(3): 235-240.
- [26] 舒广龙,刘继顺,马光. 内蒙古满洲里地区银铅锌矿赋矿地层特征及其时代探讨[J]. 中国地质, 2003, 30(3): 297-301.
Shu G L, Liu J S, Ma G. Characteristics of the host strata of Ag-Pb-Zn deposits in Manzhouli, Inner Mongolia and a discussion of their age [J]. Geology in China, 2003, 30(3): 297-301.
- [27] 叶家瑜,姚岚. 区域地球化学调查样品分析质量控制方法探讨

- [J]. 岩矿测试, 2004, 23(2): 137-142.
- Ye J Y, Yao L. Discussion of quality control method for the analysis of samples in regional geochemical survey [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2004, 23(2): 137-142.
- [28] 郑存江. 地质标准物质不确定度评估方法初探 [J]. 岩矿测试, 2005, (4): 284-286.
- Zheng C J. Primary investigation for evaluation of uncertainty of geological reference materials [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2005, (4): 284-286.
- [29] 徐进力, 邢夏, 张勤, 等. 电感耦合等离子体发射光谱法直接测定铜矿石中银铜铅锌 [J]. 岩矿测试, 2010, 29(4): 377-382.
- Xu J L, Xing X, Zhang Q, et al. Direct determination of silver, copper, lead and zinc in copper ores by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(4): 377-382.
- [30] 张勤, 白金峰, 王焯. 地壳全元素配套分析方案及分析质量监控系统 [J]. 地学前缘, 2012, 19(3): 33-42.
- Zhang Q, Bai J F, Wang Y. Analytical scheme and quality monitoring system for China Geochemical Baselines [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 33-42.
- [31] 罗立强, 吴晓军. 现代地质与地球化学分析研究进展 [M]. 地质出版社, 2014.
- Luo L Q, Wu X J. *Advances in geoanalysis* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [32] 曹立峰, 王敏捷, 申硕果, 等. 活动态提取-电感耦合等离子体质谱法测定栾川矿集区深穿透地球化学样品中铜铅锌钨钼 [J]. 岩矿测试, 2015, (4): 424-429.
- Cao L F, Wang M J, Shen S G, et al. Determination of Cu, Pb, Zn, W and Mo in deep-penetrating geochemical samples of the Luanchuan ore concentrated district by ICP-MS with extraction elements of mobile forms [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2015, 34(4): 424-429.
- [33] Cheng H X, Zhao C D, Liu Y H, et al. Geochemical exploration for platinum-group element deposits in Miyi County, Sichuan province, southwestern China [J]. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2015, 15: 39-53.
- [34] 胡云沪, 江望, 阳明. 甘肃花石山金矿区综合化探异常特征及找矿预测 [J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(2): 209-216.
- Hu Y H, Jiang W, Yang M. Intergrated geochemical anomaly characteristics and Huashishan gold deposit prediction in Gansu [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2013, 33(2): 209-216.
- [35] 李前志, 周军, 刘磊, 等. 岩石地球化学异常下限的确定方法对比——以云南思姑锡矿区为例 [J]. 地质找矿论丛, 2015, 30(3): 429-434.
- Li Q Z, Zhou J, Liu L, et al. Comparison of low limit determination methods of petro-geochemical anomaly — Taking Sigu area of Yunnan as an example [J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2015, 30(3): 429-434.
- [36] Yang F, Kong M, Liu H Z, et al. Discovery of Wolitu Pb-Zn deposit through geochemical prospecting under loess cover in Inner Mongolia, China [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(5): 951-960.
- [37] 曹园园, 李新虎. 地球化学综合异常的圈定及找矿效果 [J]. 物探与化探, 2017, 41(1): 58-64.
- Cao Y Y, Li X H. Delineation of synthetic geochemical anomaly and evaluation of its effectiveness in ore prospecting [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(1): 58-64.

A geochemical ore-prospecting experiment by extracting Fe-Mn oxides bound in soil samples in the Toudaojing Cu-Au deposit in Xin Barag Right Banner, Inner Mongolia

YANG Fan^{1, 2, 3, 4}, HAO Zhi-Hong^{2, 3}, ZHANG Su-Rong⁵, XU Jin-Li^{2, 3}, WANG Jing-Bin¹,
CHENG Hang-Xin^{2, 3}, HU Rui-Zhong⁴, ZHANG Shun-Yao^{2, 3}

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 2. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 5. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: The ore-prospecting effect of the stream sediment survey and the soil geochemistry survey is not ideal in the covered areas of the hilly grassland landscape where the water system is not developed whereas the aeolian sand is very developed. Therefore, it is imperative to carry out some new ore-prospecting experiment for prospecting breakthrough. In this study, the experiment was carried out by using the Fe-Mn oxides bound in the soil samples in a selected experimental site. The Toudaojing Cu-Au deposit in Xin Barag Right Banner of Inner Mongolia was selected as the experimental site. Soil samples were collected in the ore area and its periphery. Element concentrations in the Fe-Mn oxides bound in soil samples were determined by matched analysis of scheme including plasma mass spectrometry, atomic fluorescence spectroscopy and flameless atomic absorption spectrometry. Areal test for this geochemical ore-prospecting technique was carried out for delineating geochemical anomaly. Geochemical anomaly was verified by drilling, and new concealed gold orebodies were found. The results show that accuracy and precision tests of the analytical method could satisfy the requirements of geochemical ore-prospecting. The Fe-Mn oxides bound in soil samples can effectively delineate the prospecting target area and find concealed gold deposits in the Toudaojing Cu-Au deposit in Xin Barag Right Banner of Inner Mongolia. Therefore, it is a successful case of geochemical ore-prospecting in the covered area.

Key words: covered area; geochemical prospecting; Fe-Mn oxides bound; gold mine; concealed orebody (本文编辑: 蒋实)