doi: 10.11720/wtyht.2026.1430
马瑛, 黄强, 牛尧, 等. 高寒浅覆盖景观区深穿透地球化学勘查技术应用与示范[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 409-420. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1430
Ma Y, Huang Q, Niu Y, et al. Application and demonstration of deep-penetrating geochemical exploration techniques in alpine shallow overburden areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 409-420. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1430

高寒浅覆盖景观区深穿透地球化学勘查技术应用与示范

马瑛[1], 黄强[1], 牛尧[1], 孙彬彬[2], 张浩[1], 张建平[3], 马宁[4], 水应东[5], 冶建虎[1]
(1. 青海省第五地质勘查院, 青海 西宁 810003; 2. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 天津 300300; 3. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810029; 4. 青海省有色第三地质勘查院, 青海 西宁 810000; 5. 青海省核工业放射性地质勘查院, 青海 西宁 810003)

摘 要: 为攻克高寒浅覆盖区隐伏矿勘查技术瓶颈, 以柴达木盆地周缘中低山荒漠草原、冲积—洪积砂砾质戈壁两大典型景观区为研究对象, 开展深穿透地球化学方法试验与示范应用。结果表明: 覆盖层细粒(d≤96 μm)、微细粒(d≤20 μm)及极细粒(d≤5 μm)物质占比, 是深穿透方法有效性与适配性评价的核心依据; 通过热龙、鱼卡金矿的多方法有效性试验, 明确了不同技术在不同景观区的适用效能差异; 优选土壤微细粒测量开展面积性示范, 圈定的异常与已知矿化带高度吻合, 并在热龙金矿发现金品位达 3.85 g/t 的隐伏矿体; 最终提出了适配于高寒浅覆盖区的"扫面—查证—定位"三级技术组合。本次研究成果为同类区域隐伏矿勘查提供了技术支撑。

关键词: 高寒浅覆盖区; 深穿透地球化学勘查; 柴达木盆地周缘
中图分类号: P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0409-12

0 引言

青海省目前已完成的区域化探和普查化探面积分别为 51.7 万 km^2 和 33.29 万 km^2, 基本实现了基岩出露区地球化学勘查的全覆盖, 建立并完善了以"−10～60 目采样粒级, 以水系沉积物为主, 土壤测量为辅"为核心体系的高寒景观区地球化学勘查方法体系, 在夏日哈木铜镍矿、沱沱河铅锌银矿等超大型矿产的发现与突破中起到了关键支撑作用[1]。然而, 针对高寒荒漠戈壁、高寒草原区等浅覆盖区, 相关地球化学勘查理论与技术仍处于探索阶段。

深穿透地球化学作为识别地表介质中成矿元素微弱异常、进而追索深部隐伏矿体的关键勘查手段, 自 20 世纪 90 年代在国内兴起以来, 在理论与方法技术层面均实现了跨越式发展[2-5], 为浅覆盖区矿床勘查提供了全新技术路径。深穿透地球化学在理论模型方面主要有地气流模型[6]、电化学迁移模型[7]、活动态模型[8]、"还原囱"迁移模型[9]、"雷暴电池"模型[10] 等。在理论模型基础上发展了多种深穿透地球化学勘查技术并得到应用, 如地气法(GEOGAS)[11]、电提取测量(CHIM)[12]、活动金属离子法(MMI)[13]、离子测量系统(IONEX)[14]、金属活动态测量方法(MOMEO)[3]、酶提取测量(ENZYMELEACH)[15]、地气纳微金属测量(NAMEG)[16]、土壤细粒级分离技术[17] 等。

青藏高原广泛分布的高寒草原与干旱荒漠构成了典型的浅覆盖景观区。2004~2007 年, 高延光等[18] 在北祁连黑海盆地应用地气测量技术, 成功圈定了可能指示深部构造或矿化信息的异常带。2012~2018 年, 黄学强等[19]、董艳秋等[20]、邱炜等[21]、高杨等[22] 进一步在高寒草原区的北祁连尕达坂、青南冻

收稿日期: 2025-12-17; **修回日期:** 2026-04-03
基金项目: 深地国家科技重大专项(2024ZD1002400); 青海省财政地质勘查专项资金项目(2024524032ky006); 青海省地矿局计划项目(青地矿〔2025〕76 号)
第一作者: 马瑛(1984−), 男, 高级工程师, 主要从事勘查地球化学研究工作。Email: 18697257956@163.com

土区的扎加同哪、多彩玛、西藏大沟等典型景观区开展了地电化学测量技术试验，初步验证了该方法在类似地区的有效性。鉴于柴达木盆地周缘中低山荒漠草原亚区与冲积—洪积砂砾质戈壁亚区分布广泛，浅覆盖特征典型，且找矿需求迫切，本研究选取这两大亚区，开展地气纳微金属测量、地电化学测量、土壤微细粒测量、金属活动态测量等多种深穿透地球化学方法的技术试验，系统评价各方法在浅覆盖区探测的有效性，为高寒浅覆盖景观区的矿产勘查提供可靠的方法支撑与技术依据。

1　区域景观特征

前人在山东胶东焦家金矿、四川雅江县木绒锂矿、紫金山外围悦洋银金铜多金属矿、新疆某盆地砂岩型铀矿、内蒙古东乌旗整装勘查区等地，开展了以地气法/地球气纳微金属测量、电提取测量（地电化学技术）、金属活动态测量等为主的深穿透地球化学方法的试验与勘查示范，这些区域包含半干旱草原、冲积平原、农田、高原、红土覆盖区等多种典型景观，验证了各类方法在不同景观与地质条件下寻找隐伏矿的有效性，且方法有效性评价及技术参数厘定都基于对景观特征的认识。因此，对景观的系统划分与清晰认知，是评价深穿透地球化学方法成效、厘定技术参数的基础。

常规化探方法技术将青海柴达木盆地及其周缘景观划分为干旱半干旱高寒山区和干旱荒漠戈壁残山区[23]。鉴于柴达木盆地浅覆盖区找矿的迫切需求，本研究围绕浅覆盖区深穿透地球化学勘查方法技术研究需求，结合野外景观踏勘与前人研究成果，将柴达木盆地周缘覆盖区划分为周缘高寒草甸—荒漠草原区等 5 类一级景观和高寒草甸—碎屑坡亚区等 8 类景观亚区（图 1、表 1）。

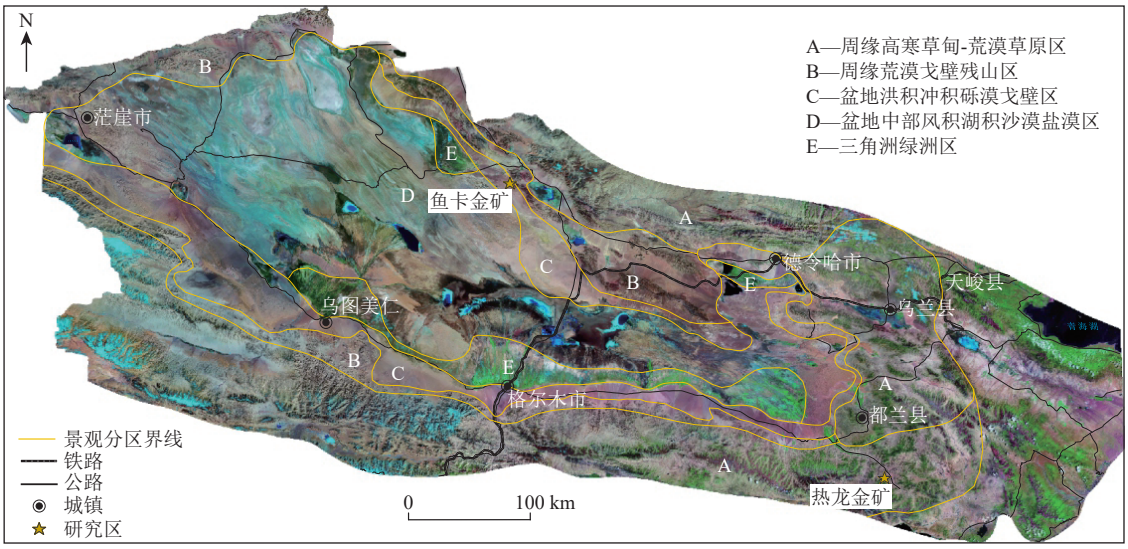


图 1　柴达木盆地周缘景观区划及研究区位置（数据源：Landsat8 30 m 多光谱遥感）

Fig. 1　Landscape zoning of the Qaidam Basin periphery and location of the study area

(data source: Landsat8 30 m multispectral remote sensing imagery**)**

2　技术路线与样品采集、分析

本次选择柴达木盆地周缘分布面积最广的中低山荒漠草原亚区和冲积—洪积砂砾质戈壁亚区 2 类浅覆盖景观区中的典型矿床开展研究。

2.1　技术路线

技术路线核心为：先开展野外踏勘调研，系统厘清覆盖层发育特征与勘查技术需求；再在已知矿体上方覆盖层中开展多方法有效性对比试验；最后择优筛选适配技术开展示范应用。

2.2　样品采集

试验剖面采样点距均为 20 m，土壤微细粒和金属活动态测量采样深度为 30~50 cm，送检样品粒级为−200 目。地气纳微金属测量每点 6 孔采样，孔间距 1 m，钻孔深度 40~50 cm，捕集液为超纯水配制的 3% 王水 18 mL，抽气量每孔 3 L（抽 2 次），每样点抽气 18 L。地电化学测量阴极埋深 40 cm 处，阳极埋深 10 cm 处，吸附载体为高密度聚氨酯泡塑，密度≥ 20 g/dm^3，用 5%~10% 偏王水进行揉洗、浸泡至少 24 h，上覆透性较好的滤纸，供电电极为重金属总含量≤50×10^{-6} 的高纯石墨电极，供电时间为 48 h，电导

表 1　柴达木盆地周缘景观划分

Table 1　Landscape classification of the surrounding area of the Qaidam Basin

一级景观区	二级景观亚区	景观特征
A 周缘高寒草甸—荒漠草原区	A-1高寒草甸—碎屑坡亚区	该亚区位于海拔4 000 m以上的高山带, 切割强烈, 坡度常达20°~45°, 局部更陡; 地表普遍发育由寒冻风化形成的碎屑坡/流石滩, 砾石、岩屑裸露, 结构松散, 无明显层理; 高寒草甸为优势景观, 群落盖度70%~90%, 以高山嵩草、矮嵩草等莎草科植物为主, 形成厚实的草毡层(毡状草根层); 在碎屑坡或裸岩地段, 盖度骤降至5%~20%, 仅零星分布垫状点地梅等耐寒先锋植物; 土壤类型为高寒草甸土, 在碎屑坡位置, 土层极薄甚至缺失, 岩屑直接接触大气, 土壤发育度低
	A-2中低山荒漠草原亚区	该亚区海拔多在2 000~3 500 m, 以低山丘陵为骨架, 山前发育洪积扇—洪积平原, 整体呈“山—扇—盆”有序排列; 植被群落盖度15%~35%, 以短花针茅、沙生针茅、芨芨草为建群种; 山地以棕钙土为主, 洪积扇下部与湖滨平原为灰漠土、灰棕漠土, 剖面厚度30~60 cm, 表层0~10 cm普遍积盐
B 周缘荒漠戈壁残山区	B-1荒漠戈壁残山亚区	该山亚区海拔一般1 000~2 500 m, 以剥蚀残山—残丘为核心, 山体低矮破碎, 山麓广布残积—洪积砾石戈壁, 砾径5~50 cm, 分选差, 丘间洼地或山前平原常见风蚀雅丹、沙垄与洪积扇相间排列, 呈现“残山—戈壁—风积”三元结构; 植被盖度<10%, 以超旱生灌木、半灌木为建群种; 发育灰棕漠土—棕漠土, 剖面厚20~60 cm, 通体砾石含量>60%; 表层具1~2 cm灰色多孔状结皮, 其下为3~15 cm灰棕色紧实层(铁质化明显), 底部常见石膏—盐盘层
C 盆地洪积冲积砾漠戈壁区	C-1山前洪积砾质戈壁亚区	该亚区海拔一般在2 000~3 500 m, 以山前洪积倾斜平原为主, 地面坡度3°~8°, 由次棱角状砂砾石组成, 呈梳状垄岗微起伏, 洪积扇上部为粗砾质戈壁, 中下部过渡为砂砾质戈壁; 植被盖度<5%, 以超旱生灌木、半灌木为优势种; 发育灰棕漠土, 剖面厚20~50 cm, 通体砾石含量>60%, 表层具1~2 cm黑褐色多孔结皮(孔状荒漠结皮), 其下为灰棕色铁质紧实层(5~15 cm), 心土常见石膏晶簇或石膏盘(厚度10~30 cm), 底部为盐盘或砂砾石母质层
	C-2冲积—洪积砂砾质戈壁亚区	该亚区海拔一般在2 000~3 000 m, 以冲积—洪积扇中下部为主, 地面坡度2°~5°, 沉积物由砂砾石—粗砂组成, 具明显水平层理与斜交层理, 局部夹风成砂透镜体, 扇缘过渡为干三角洲或湖积盐沼, 呈“扇—盐”带状排列; 植被盖度<5%, 以超旱生灌木、半灌木为优势种; 发育石膏盐盘灰棕漠土, 剖面厚30~60 cm, 砾石含量50%~70%, 表层具1~2 cm黑褐色孔状结皮, 其下为灰棕色铁质紧实层(5~15 cm), 心土为石膏—硫酸盐盘(10~30 cm, 石膏含量20%~40%, 盐分>2%)
D 盆地中部风积湖积沙漠盐漠区	D-1风蚀风积沙漠亚区	该亚区海拔一般在2 000~3 000 m, 风蚀形成雅丹地貌, 风积形成新月形沙丘、线形沙丘, 与盐湖、冲积扇、残山交错成“丘—盐—扇”复合格局; 植被盖度 <3%, 仅零星分布梭梭等超旱生灌木
	D-2湖积盐漠亚区	地势极为平坦, 坡降仅0.015%~0.06%, 地表被厚层盐壳覆盖, 常见龟裂纹、翻耕状微起伏; 沉积物为黏土—粉砂质湖积层, 含石盐、石膏、钙芒硝等蒸发盐矿物, 剖面中常出现盐—泥韵律层; 属荒漠盐土或盐壳初育土, 通体含盐量20%~50%, 石膏层位10~30 cm, pH 8~10, 呈强碱性; 有机质 <0.3%, 几乎无腐殖质层
E 三角洲绿洲区	E-1河谷绿洲亚区	沿河流分布, 人类活动密集

液为研究区地表水 1 L。

2.3　测试分析

土壤样品中 Au 的测定: 称取 10.00 g 土壤样品置于瓷坩埚中, 于高温炉内 650 ℃ 下焙烧 1 h。冷却后, 采用王水(50 mL)于微沸状态下溶解 1~3 h。溶液经稀释后, 利用泡沫塑料动态吸附富集 Au, 再用 5.0 mL 硫脲溶液于沸水浴中解脱 30 min, 制备成待测溶液, 采用 ICP-MS 测定。

地电化学泡塑样品中 Au 的测定: 将样品用硝酸—高氯酸混合酸在电热板上进行长时间(>12 h)预处理, 彻底分解有机物。蒸干后, 用 10 mL 王水复溶, 溶液定容至 20 mL, 澄清后直接上机采用 ICP-MS 测定 Au 含量。

地气样品中 Au 的测定: 样品溶液经 0.45 μm 滤膜过滤后, 采用 ICP-MS 直接测定。其中, As 的测定结果通过校正同质异位素(如 Sm、Nd 氧化物)的干扰后获得。

活动态 Au 的提取: 活动态分析采用贱金属元素专用提取剂进行提取, 该提取剂主要由草酸铵、柠檬酸铵、乙二胺四乙酸钠 (EDTA)、二乙基三胺五乙酸 (DTPA)、氨基三乙酸 (NTA)、三乙醇胺 (TEA) 组成。采用顺序提取法, 依次进行水提取态、黏土吸附态、有机结合态和铁锰氧化物态的分离和提取[24-25]。

Au 专用提取剂法: 此方法由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研发, 提取剂主要由柠檬酸铵、硫脲和硫代硫酸钠组成。

3　结果与讨论

3.1　覆盖层物理化学特征

Kelly 在 1995 年就指出不同覆盖层对深穿透方法影响很大, 强调在解释推断时必须研究覆盖层的粒级与土壤组分[26]。因此笔者对研究区覆盖层物质成分及其对元素特征的影响开展前期研究, 为后续解释推断奠定基础。

3.1.1　覆盖层物质成分

对中低山荒漠草原亚区和冲积—洪积砂砾质戈壁亚区覆盖层物质成分进行对比分析, 首先对表层

10~30 cm 单位体积内物质进行筛分称重，然后重点对−160 目（d≤96 μm）物质用激光粒度分析仪进行粒度分析（表 2）。

表 2　浅表覆盖层物质成分占比

Table 2　Composition of the shallow overburden

粒径		成分占比/%	
		中低山荒漠草原亚区	冲积—洪积砂砾质戈壁亚区
−10目粒级（d<8.5 mm）	−10～+60目	9.43	33.1
	−60～+120目	9.52	17.33
	−120～+160目	7.65	10.55
	−160～+180目	23.47	9.58
	−18～+200目	18.08	12.59
	−200目	31.85	16.85
−160目粒级（d<96 μm）	≤1 μm	3.84	7.69
	≤2 μm	7.71	14.67
	≤5 μm	13.43	23.75
	≤10 μm	19.91	32.48
	≤20 μm	35.45	49.47
	≤50 μm	83.73	89.71
	≤94 μm	100	100

不同景观亚区覆盖层的物质组成存在显著差异：中低山荒漠草原亚区覆盖层中，细粒物质（−160 目）占比达 73.4%，其中−200 目物质占比为 31.85%；而冲积—洪积砂砾质戈壁亚区覆盖层中，细粒物质（−160 目）占比仅为 39.02%，其中−200 目物质占比为 16.85%，显著低于中低山荒漠草原亚区。

值得注意的是，若以单位质量细粒物质（d≤96 μm）为统计基准，冲积—洪积砂砾质戈壁亚区的细粒物质内部组分占比均高于中低山荒漠草原亚区，且组分差异特征鲜明：前者极细粒物质（d≤5 μm）占比达 23.75%，后者仅为 13.43%；前者微细粒物质（d≤20 μm）占比 49.47%，后者为 35.45%。

细粒物质（尤其是极细粒物质）具有更强的吸附性与迁移能力，是深穿透地球化学勘查中捕获深部矿体地球化学信息的核心载体，其含量与组分差异直接影响深部信息的富集效率与可识别性。因此，上述不同亚区覆盖层的细粒物质组成特征，极可能是调控深穿透地球化学勘查方法有效性的关键因素，可为勘查区采样介质优选、干扰层识别及勘查方案优化提供核心依据。

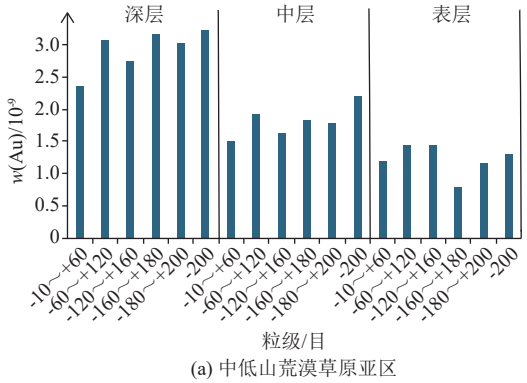
3.1.2　地球化学特征

为了掌握覆盖元素在覆盖层的含量特征或迁移规律，在不同矿区已知矿带上方布设垂直剖面，并分 3 个层位采集样品：表层（0～30 cm）、中层（30～100 cm）、深层（100 cm 以下）。对比不同层位、不同粒级中的元素含量特征（表 3，图 2），结果如下：①中低山荒漠草原亚区覆盖层 Au 含量均值明显低于冲积—洪积砂砾质戈壁亚区；②两种景观亚区 Au 含量均呈

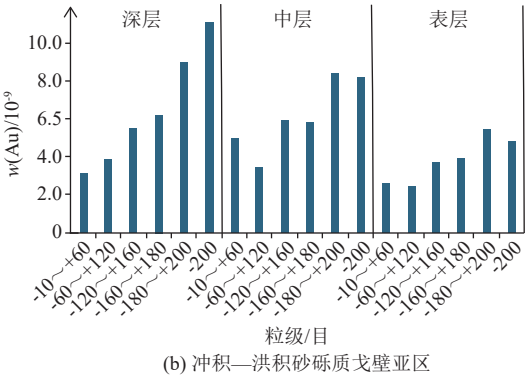
表 3　不同研究区覆盖层垂向 Au 含量特征

Table 3　Characteristics of vertical Au content in overburden of different study areas

位置	粒级/目	Au含量/10^{-9}	
		中低山荒漠草原亚区	冲积—洪积砂砾质戈壁亚区
表层	−10～+60	1.19	2.59
	−60～+120	1.44	2.43
	−120～+160	1.45	3.66
	−160～+180	0.80	3.92
	−180～+200	1.16	5.44
	−200	1.30	4.80
中层	−10～+60	1.52	4.95
	−60～+120	1.93	3.46
	−120～+160	1.63	5.85
	−160～+180	1.82	5.82
	−180～+200	1.78	8.38
	−200	2.20	8.21
深层	−10～+60	2.36	3.16
	−60～+120	3.07	3.83
	−120～+160	2.76	5.49
	−160～+180	3.17	6.19
	−180～+200	3.03	8.97
	−200	3.24	11.1



(a) 中低山荒漠草原亚区



(b) 冲积—洪积砂砾质戈壁亚区

图 2　覆盖层不同亚区 Au 含量柱状分布

Fig. 2　Bar chart of Au content in different sub-regions of the overburden layer

现从深层向表层递减趋势, 中层 Au 含量高于表层而低于深层, 说明中层物质继承了来自深层的部分成矿物质; ③不同层位均显示随着粒级变细 Au 含量逐步增加的趋势, 且冲积—洪积砂砾质戈壁亚区该趋势更为显著。

王学求等[27] 研究证实, 纳米尺度的金颗粒可以在表生环境中稳定存在并进行机械迁移, 这些纳米金颗粒因其具胶体性质, 会选择性附着在同样处于胶体尺度的黏土矿物或铁锰氧化物表面, 在覆盖层中, 这些载金纳米颗粒最终汇聚在细粒级组分中, 研究区 Au 含量与不同粒级的关系也佐证了这一结论。

由于研究区位于柴达木盆地周缘, 表层覆盖物受到大量外来风成沉积的影响, 对深部地球化学异常信息具有明显的“稀释”与干扰作用。而中层(特别是 30 cm 以下深度)在物质组成上对来自深部的元素信号具有良好的继承性与保留效果。因此, 从兼顾采样成本、工作效率和异常信息可靠性的角度出发, 选择 30～50 cm 作为采样深度, 既能有效规避表生风成物的干扰, 又能捕获较为清晰的深部元素迁移信号, 适宜作为该区域大规模地球化学勘查的推荐采样方案。

3.2　方法有效性验证

为了验证不同方法在不同景观条件下的有效性, 选择中低山荒漠草原亚区的热龙金矿、山前洪积砾质戈壁亚区的鱼卡金矿开展方法技术试验。

3.2.1　热龙金矿

1)景观特征

区内整体由风积物覆盖, 局部基岩出露, 覆盖厚度 0.2～20 m。在坡度小于 20°的区域, 覆盖层厚度 1.5～20 m, 主要为风成黄土, 植被覆盖度约 30%～50%; 在坡度大于 20°的区域, 覆盖层厚度为 0.2～5 m, 空间分布不均, 除风成黄土外, 混入较多残坡积岩屑, 植被覆盖度降至 15%～30%。

2)矿床特征

热龙金矿含矿带主要产于晚泥盆世闪长岩、二长花岗岩及斜长花岗岩体中的断裂构造带内, 呈 NW 向条带状近平行产出, 倾向 NE 向, 目前区内共发现 5 条含矿构造蚀变带, 圈出 9 条金矿体。本次以 Au Ⅰ、Au Ⅱ、Au Ⅴ矿带为研究对象(图 3), 其中 Au Ⅰ矿带长 6.7 km, 厚 1～10.3 m, 带内圈出金矿体 2 条(AuI-1、AuI-2)。AuI-1 矿体最大控制斜深 120 m, 矿体长 960 m, 平均厚 2.32 m, 最厚达 5.04 m, 产状 13°～40°∠65°～73°, 金平均品位 3.15 g/t, 最高为 30 g/t。该矿体含矿岩性为构造蚀变岩和蚀变二长花岗岩, 蚀变以硅化、高岭土化为主, 矿化以褐铁矿化、星点状、细脉状、小团块状的黄铁矿化和方铅矿化为主。

3)勘查需求

区内以往开展了 1∶2.5 万地球化学测量, 点密度为 22 个点/km^2, 采样介质为水系沉积物测量, 在区

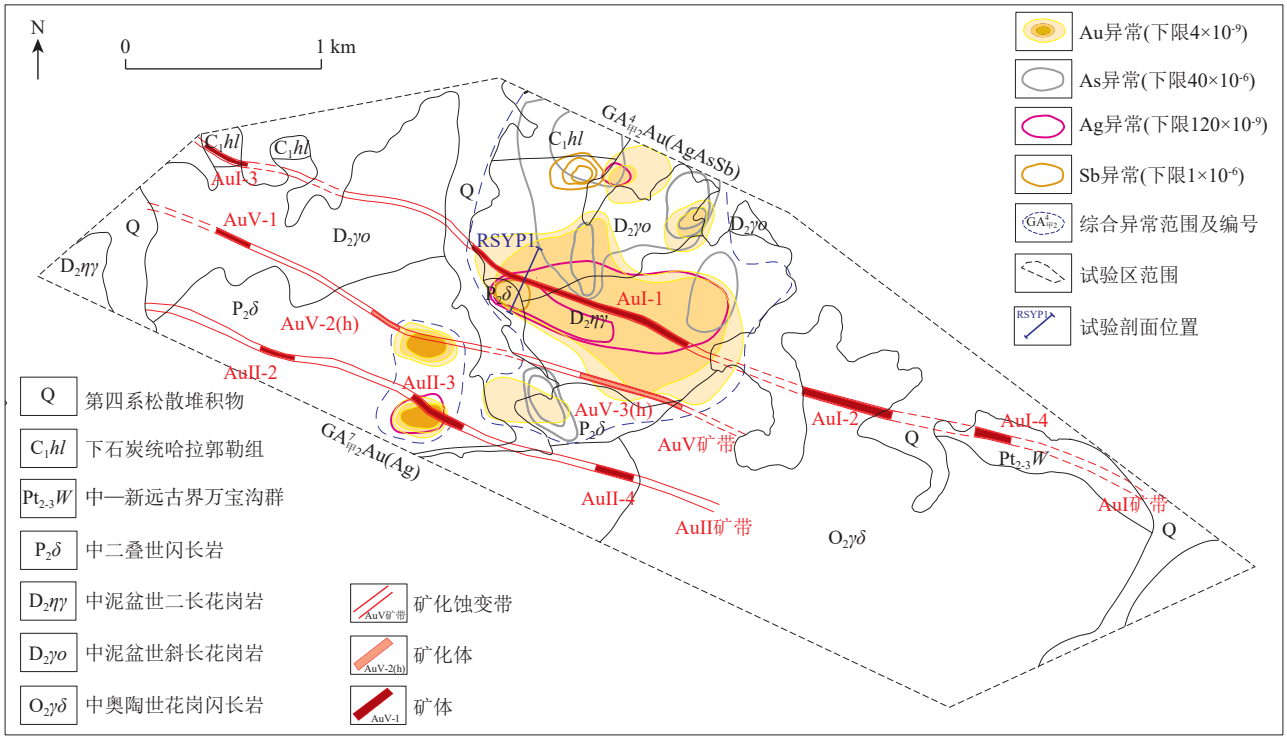


图 3　热龙地区水系沉积物测量综合异常

Fig. 3　Integrated anomaly of stream sediment survey in Relong Area

内圈定 $GA^{4}_{甲2}$Au(AgAsSb)和 $GA^{7}_{甲2}$Au(Ag)2 处综合异常，其中 $GA^{4}_{甲2}$Au(AgAsSb)异常 Au 峰值 32.60×10^{-9}，As 峰值 175×10^{-6}，Ag 峰值 417×10^{-9}(表 4，图 3)。

通过对 2 处水系沉积物测量综合异常的查证及工程验证工作，发现了 AuI-3 与 AuⅡ-3 金矿体。但受矿体东南及北西延伸方向厚层黄土覆盖的制约，岩石、残坡积土壤样品的采集工作难以实施，需通过深穿透地球化学勘查手段进一步补充佐证。

表 4　$GA^{4}_{甲2}$Au(AgAsSb)异常参数特征

Table 4　Characteristics of $GA^{4}_{甲2}$Au(AgAsSb) anomaly parameters

元素	异常点数	面积/km^2	最高值	平均值	衬度	规模	异常下限
Au	24	1.04	32.60	14.57	3.64	3.28	4
As	20	0.77	175.00	77.20	1.93	1.45	40
Ag	10	0.41	417.00	220.00	1.83	0.73	120
Sb	3	0.11	8.08	8.08	8.08	0.79	1

注：Au、Ag含量单位为10^{-9}；其余为10^{-6}。

4)方法有效性实验

在热龙矿区 AuI-1 矿体 RSYP1 号勘探线布设长 280 m 的实验剖面 (图 3)，系统采集样品 14 组。该剖面区全段覆盖风成黄土，厚度介于 1～15 m 之间。对土壤微细粒测量、金属活动态测量、地气纳微金属测量、地电化学测量及金专用提取法 5 种方法开展系统对比分析(图 4)，结果如下：①土壤微细粒测量与地气纳微金属测量结果一致性良好，在矿化蚀变带发育的 8 号、9 号点位均呈现显著高值异常，精准对应矿化发育地段；②地电化学测量虽在 8 号、9 号矿化点位出现高值响应，但在 4 号、13 号非矿化点位亦呈现相对高值，难以明确判定异常成因；③金属活动态测量中，黏土吸附态 Au 在 8 号点位形成显著峰值，与矿体空间位置精准对应；而铁锰氧化物态 Au 含量波动与矿化蚀变带的对应关系不显著；④金专用提取法在 8 号矿体对应点位同样出现特征性高值峰值，异常指示明确。

综合分析表明，在该类风成黄土覆盖景观条件下，土壤微细粒测量、金属活动态测量(尤以黏土吸附相 Au 测量为优)及金专用提取法对隐伏矿化信息的识别能力突出，异常与矿体对应精准、成因明确。上述 3 种方法可作为同类景观区隐伏金矿勘查的有

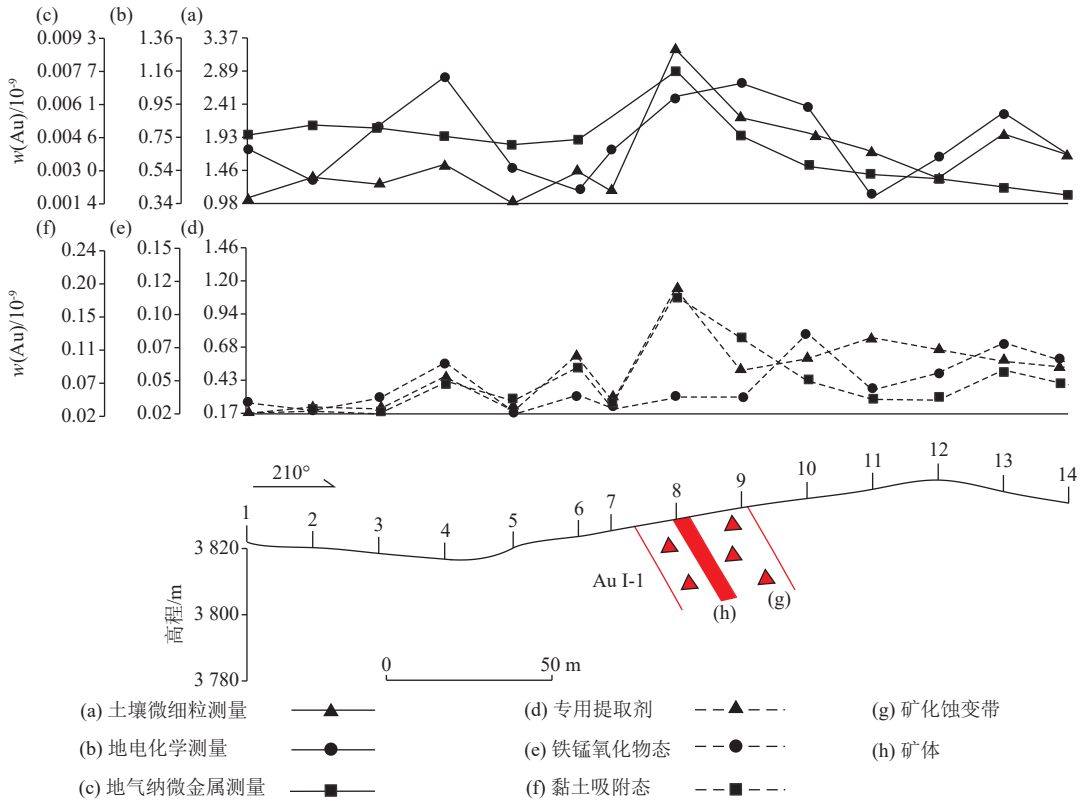


图 4　热龙金矿 RSYP1 号勘探线试验剖面 Au 含量曲线

Fig. 4　Au content curve of trial profile along exploration line RSYP1 in Relong gold deposit

效技术手段, 具备推广应用价值。

5)应用示范

基于方法试验成果, 同时考虑到效率及成本, 在该矿区开展土壤微细粒测量, 面积 8 km^2, 采集土壤微细粒样品 371 件, 分析 Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn、Sb 共 7 种元素。通过主成分分析, 钻孔岩石样中 Au-As-Ag-Sb 位于散点图右象限高值区域(图 5a), 土壤微细粒样品中 Au-As-Ag 位于散点图右上象限(图 5b), 均表现为相关性较好的系列元素组合, 这是非常典型的低温热液金矿化标志性, 是该矿区的主成矿元素组合, 因此以圈定的 Au-As-Ag 组合异常判断该区矿化富集部位。

以金含量 2×10^{-9}、3×10^{-9}、4×10^{-9} 为异常分带阈值, 分别圈定外、中、内带, 共圈定出土壤金异常 20 处(图 6)。其中, TR01、TR02、TR05、TR06、TR09、TR10、TR11、TR15 及 TR19 共 9 处异常强度较高。

结合现有勘查成果, TR06、TR07、TR10、TR11、TR12、TR14 及 TR15 共 7 处异常空间分布与已知矿化蚀变带吻合较好。在已知矿化体地段, 异常多呈现外—中—内三级分带或外—中二级分带特征。针

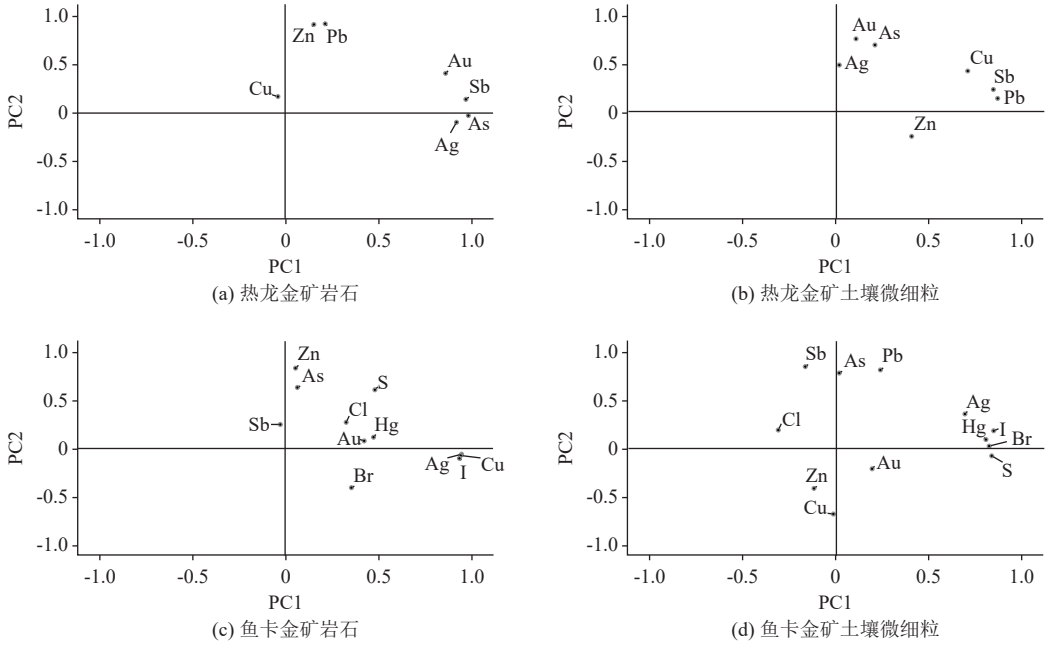


图 5　主成分分析空间得分

Fig. 5　PCA spatial score plot

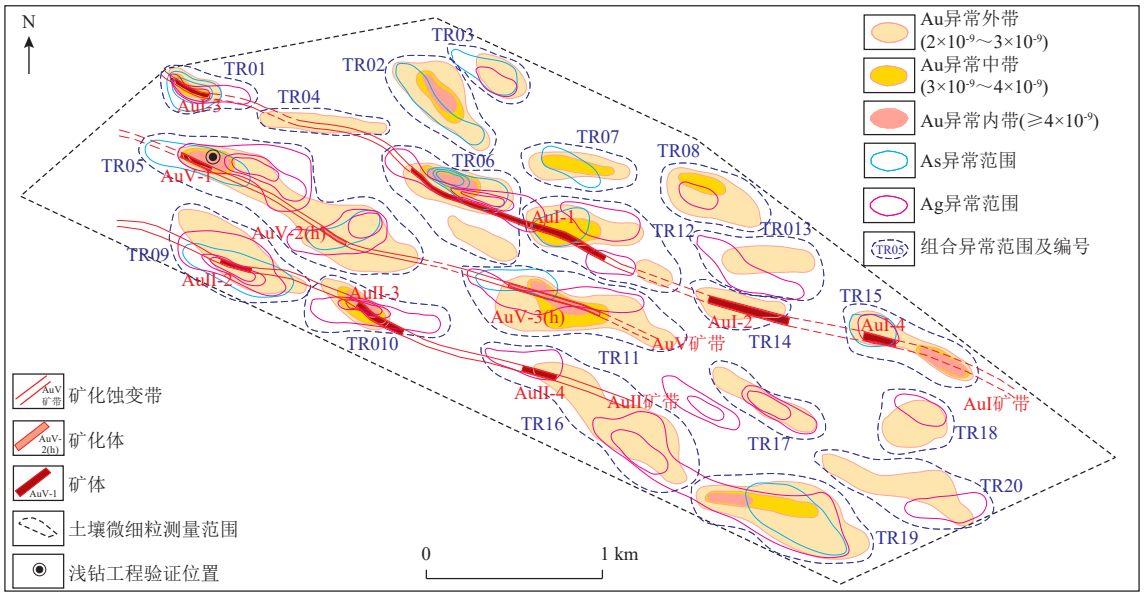


图 6　热龙金矿 Au-Ag-As 组合异常

Fig. 6　Composite anomaly of Au-Ag-As in the Relong gold deposit

对 TR05 异常实施的工程验证表明，在厚约 4 m 的覆盖层之下见有一条宽约 1.2～1.8 m 的矿化蚀变带，其走向 NW，倾向 NE，与 AuV 含矿构造蚀变带特征一致，推测为该带 NW 向延伸部分。该蚀变带内普遍发育硅化与高岭土化，矿化以强烈褐铁矿化及星点状黄铁矿化为主，化学样分析结果显示金品位达 3.85 g/t。另外对 TR01、TR11 验证后均发现具有金矿化的蚀变带。

同比例尺水系沉积物与土壤微细粒测量结果对比来看，水系沉积物测量所圈定的异常强度高、元素组合特征清晰，异常指示性强，能高效圈定找矿靶区；但受工作条件限制，在局部浅覆盖区域难以采集合格水系沉积物样品，无法有效反映矿化信息。土壤微细粒测量虽然异常强度偏低、元素组合相对简单，但可在浅覆盖区有效开展工作，能有效反映覆盖层下矿化蚀变带的空间展布特征，是高寒浅覆盖区地球化学勘查中有效的补充手段。

3.2.2　鱼卡金矿

1）景观特征

区内东南部基岩裸露，西北部为洪积—冲积砂砾质戈壁，覆盖层厚度不详，上部 0～20 cm 以风积物为主，含少量砾石；下部主要为冲洪积物，砾径较小且磨圆度较差。该区植被发育较差，覆盖率低于 5%。

2）矿床特征

矿区出露滩间山群变火山岩岩组（$\in OT_1$），为变玄武岩、安山质玄武岩、变安山岩组合而成，发育 NW—NNW 向断裂构造，沿构造石英脉密集展布。区内共发现 6 条含矿带，均呈 NW 向，圈定金矿体 21 条、铜矿体 1 条，Au 品位 0.83～23.23 g/t。其中Ⅲ号金矿带呈 NW—SE 向展布，长 3 050 m，宽 10～50 m，带内Ⅲ-1 矿体长约 280 m，真厚度 0.61～2.13 m，产状 60°∠65°，Au 品位 0.89～32.9 g/t，含矿岩性为糜棱岩化绿泥绿帘片岩，发育硅化、褐铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化 (图 7)。

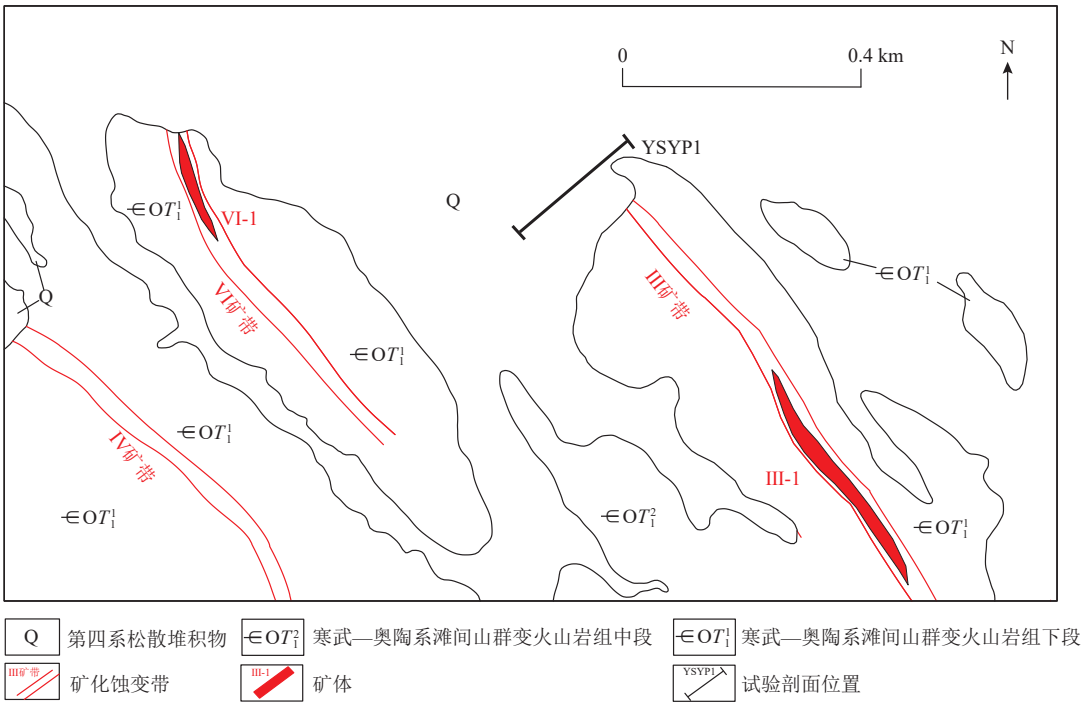


图 7　鱼卡金矿地质矿产简图

Fig. 7　Geological-mineral sketch map of Yuka gold deposit

3）勘查需求

该矿区Ⅲ、Ⅵ号矿化带 NW 向延伸段均被洪积砾质戈壁覆盖，矿带延展情况不明，需要通过深穿透地球化学方法对矿带的延伸情况进行分析预测。

4）方法有效性试验

在鱼卡金矿区Ⅲ-1 矿体 NW 向延伸段的浅覆盖区布设了一条长 260 m 的试验剖面（图 7），剖面整体覆盖厚度 10～20 m，共采集样品 13 组，系统开展了土壤微细粒测量、地电化学测量及地气纳微金属测量 3 种方法的效果对比试验（图 8）。结果如下：①土壤微细粒测量与地电化学测量在 5 号点位均呈现明显高值异常，异常衬度高、显示清晰，该点位与Ⅲ号矿带走向吻合，表明两种方法能有效指示浅覆盖层下矿带位置；②地气纳微金属测量中 Au 含量在剖面上变化平缓，未呈现明显规律性异常。

分析认为，在该类景观条件下，土壤微细粒测量

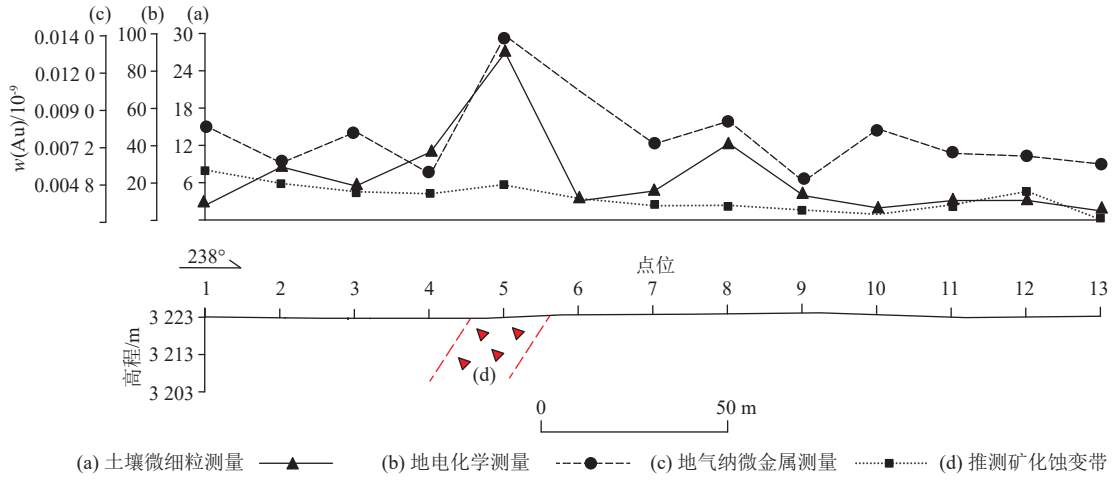


图 8　鱼卡金矿Ⅲ矿带试验剖面 Au 含量曲线

Fig. 8　Au content curve of test profile for ore block Ⅲ in the Yuka gold deposit

与地电化学测量在识别隐伏矿化信息方面效果显著, 可作为类似浅覆盖区的有效勘查手段。

5)应用示范

该矿区测量面积 5 km^2, 采集土壤微细粒样品 197 件, 分析 Au、Ag、As、Cu、Pb、Zn、Sb、Cl、Br、I、S 共 11 种元素。对岩石与土壤微细粒样品的主成分分析结果揭示出二者具显著差异。钻孔岩石样品中, Au 与 Hg、Cl、S、As、Zn 等元素在散点图上集中于右上象限, 表现出良好的相关性(图 5c), 该组合有效指示了本区存在一期受构造控制的低温热液金矿化作用。然而, 在土壤微细粒样品中, Au 与其他元素的相关性普遍较差(图 5d)。分析认为, 这种差异主要源于特殊的表生地球化学环境。在冲洪积砾质戈壁景观下, 强烈的蒸发作用使土壤盐壳中富集大量 Cl^-、SO_4^{2-}等盐分离子。这些离子可能对 Hg、As 等元素产生络合作用, 使其在特定地球化学障中发生沉淀而富集; 而 Au 因其化学性质稳定, 受此过程影响较小, 从而在迁移富集机制上与其他元素发生解耦, 导致在土壤介质中表现为独立异常。

基于上述认识, 本研究确定利用 Au 单元素异常在该景观区进行找矿预测更为直接有效。采用 EDA 法确定了 Au 含量的异常阈值[28], (5～10)×10^{-9} 为外带、(10～20)×10^{-9} 为中带、≥20×10^{-9} 为内带, 并据此圈定了土壤微细粒测量的地球化学异常(图 9)。

区内共圈定出 7 处强度高、浓集中心明显的 Au 异常带。异常整体呈 NW 向展布, 与矿区已知的Ⅲ、Ⅵ号金矿带及构造蚀变带的走向一致, 显示出良好的空间对应关系。通过 1∶1 万土壤微细粒剖面 TP1 对 TR03 进行了查证, 异常重现性好 (图 9)。这一结果表明, 本次工作所获得的土壤 Au 异常对深部隐伏矿体具有良好的指示意义, 所圈定的异常靶区是下一步工程验证的重点区域。

3.3　方法有效性影响因素分析

深穿透地球化学勘查的核心原理是利用针对性提取与观测技术, 追踪在多营力驱动下从深部矿体迁移至地表覆盖层的离子、络合物及超微细纳米级颗粒, 进而实现隐伏矿化异常的精准识别[4,27]。其中, 超微细纳米级颗粒作为关键信息载体, 其表生迁移与富集特征已通过微观观测证实[27]; 而蒸发作用、水动力等多营力对迁移过程的调控机制, 可通过经典深穿透地球化学迁移模型得到阐释[4]。因此, 在矿化强度、方法技术参数一致的前提下, 不同景观区覆盖层属性的精准研判, 成为决定方法适用性与异常解释精度的核心要素。

通过对比中低山荒漠草原亚区与冲积—洪积砂砾质戈壁亚区的覆盖层物质组成, 结果发现: 两类景观区覆盖层中细粒物质(−160 目, d≤96 μm)、微细粒物质(d≤20 μm)及极细粒物质(d≤5 μm)的含量占比存在统计学意义上的显著性差异; 同时, 两类景观区覆盖层不同层位、不同粒级中的 Au 含量也呈现显著分化。这一现象表明, 不同景观区覆盖层的空隙度、密闭性及微细颗粒吸附能力等物理化学性质存在本质差异, 而这些差异直接调控着深穿透地球化学方法对矿化信息的捕获效率和异常的强度与清晰度, 进而影响不同勘查技术的应用有效性。

进一步对比热龙、鱼卡两矿区的岩石与土壤微细粒元素相关性特征发现, 元素组合呈现明显的表生分异规律: 热龙矿区岩石中 Au-Ag-As-Sb 的原生元素组合, 在土壤微细粒中简化为 Au-Ag-As 组合; 鱼卡矿区岩石中 Au-Hg-Cl-S-Br 的多元素关联组合,

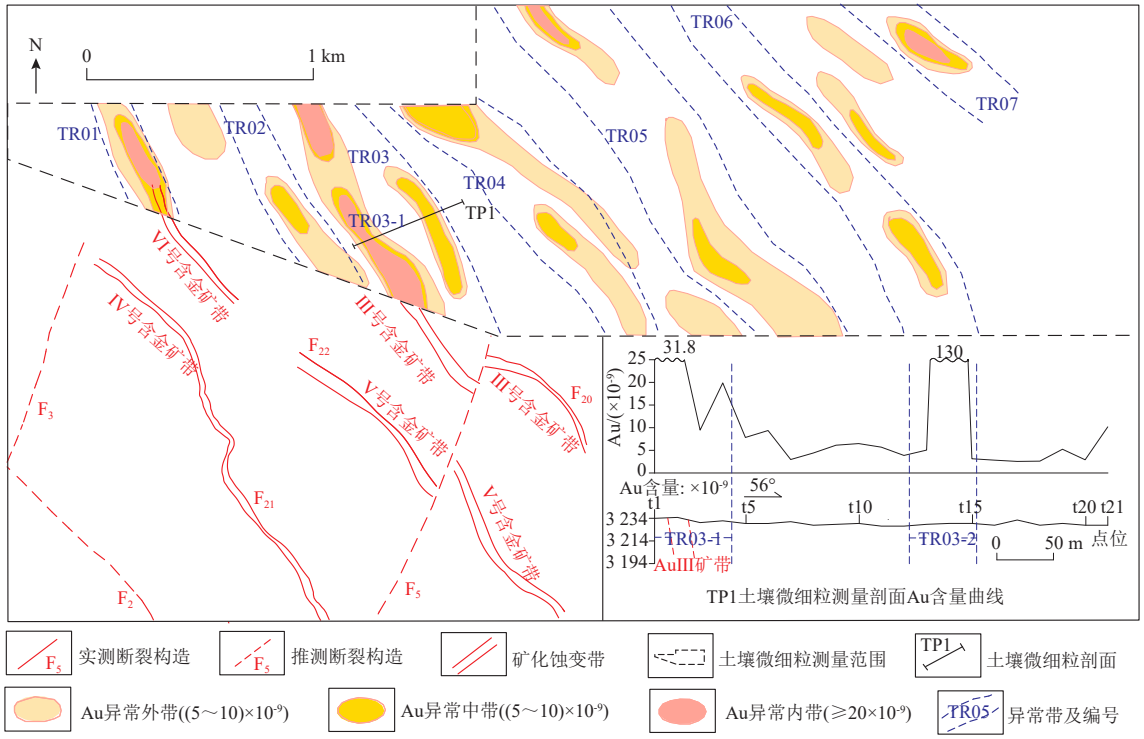


图 9　鱼卡金矿 Au 异常分布

Fig. 9　Abnormal distribution of Au in the Yuka gold depositt

在土壤微细粒中进一步精简为单一 Au 异常。这一差异可能主要源于两类景观区气候环境的显著不同，中低山荒漠草原与冲积—洪积砂砾质戈壁的淋滤强度、蒸发速率等表生地球化学作用存在明显分异，直接影响了成矿相关元素的迁移路径、赋存形态及保存效率，最终导致不同勘查方法的异常响应特征及应用有效性产生分化。

4　结论

1)柴达木盆地周缘中低山荒漠草原亚区与冲积—洪积砂砾质戈壁亚区的覆盖层物质组成和地球化学特征呈现显著景观分异性。其中，细粒物质(d≤96 μm)、微细粒物质(d≤20 μm)及极细粒物质(d≤5 μm)的成分占比是核心指标，直接影响区域元素地球化学背景及矿化物质表生保存机制，而覆盖层的这种差异性，构成了深穿透地球化学勘查方法选择的重要依据。

2)不同景观亚区的矿床覆盖层特征差异显著，适配的勘查方法亦有所不同：热龙金矿覆盖层特征表现为以风成黄土为主，粗粒物质占比低、空隙度小，微细粒与极细粒物质相对含量少、盐分含量低；地球化学特征表现为 Au 背景值低且垂向含量变化幅度小；方法实验表明土壤微细粒测量、地气纳微金属测量可清晰反映覆盖层下矿化带(体)位置，但异常衬度较低，地电化学测量则存在异常指示不唯一的问题。鱼卡金矿覆盖层特征表现为以冲积—洪积物及风积物为主，粗粒物质占比高、空隙度大，微细粒与极细粒物质相对含量高、盐分含量高；地球化学特征表现为 Au 背景值高且垂向含量变化幅度大；方法实验表明土壤微细粒测量与地电化学测量的异常衬度高，能精准指示矿化带位置，而地气纳微金属测量对该类景观区矿化带无有效表征。

3)本次应用示范取得成效，依托该方法试验成果开展 1∶2.5 万土壤微细粒测量，实现了靶区与成矿有利地段的快速圈定。其中，热龙矿区圈定 Au-As-Ag 组合异常 20 处，异常展布与矿化带高度吻合，经工程验证成功发现金品位达 3.85 g/t 的新隐伏矿化体；鱼卡矿区则结合特殊表生地球化学环境下 Au 的独立异常特征，圈定 Au 异常带 7 条，有效指示隐伏矿带延伸方向。结果表明在浅覆盖区无法开展常规土壤测量或岩石测量的情况下，土壤微细粒测量可作为有效的补充，为高寒浅覆盖景观区隐伏矿勘查提供技术支撑。

4)初步构建了适配高寒浅覆盖区的“扫面—查证—定位”三级方法技术组合：土壤微细粒测量具有广泛普适性，可作为快速扫面、圈定找矿靶区的基础手段；结合景观特征，选择地电化学测量或地气纳微金属测量作为异常查证手段，可大致锁定矿化带范围；金属活动态测量(黏土吸附态)和金专用提取剂法对

矿体响应灵敏, 能够实现矿体的精准定位。

参考文献(References):

[1] 奚小环, 戴意蕴, 王永华, 等. 中国区域化探: 历史、成就与未来 [J]. 物探与化探, 2025, 49(5): 989−1007.
Xi X H, Dai Y Y, Wang Y H, et al. Regional geochemistry of China: History, achievements and future[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(5): 989−1007.

[2] 谢学锦. 战术性与战略性的深穿透地球化学方法 [J]. 地学前缘, 1998, 5(2): 171−183.
Xie X J. Tactical and strategic deep penetration geochemical surveys[J]. Earth Science Frontiers, 1998, 5(2): 171−183.

[3] 王学求. 深穿透勘查地球化学 [J]. 物探与化探, 1998, 22(3): 166−169, 165.
Wang X Q. Deep penetration exploration geochemistry[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 22(3): 166−169, 165.

[4] 王学求. 深穿透地球化学迁移模型 [J]. 地质通报, 2005, 24(S1): 892−896.
Wang X Q. Conceptual model of deep-penetrating geochemical migration[J]. Geological Bulletin of China, 2005, 24(S1): 892−896.

[5] 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.

[6] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of ^{222}Rn in the ground and a new physical model for the transport[J]. Geophysics, 1982, 47(10): 1444−1452.

[7] Goldberg I S. Vertical migration of elements from mineral deposits[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61(1-3): 191−202.

[8] Wang X Q. Leaching of mobile forms of metals in overburden: Development and application[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 61(1-3): 39−55.

[9] Hamilton S M. Reduced chimneys and electrochemical transport over oxidizable geological features [R]. Ontario: Ontario Geological Survey, 2000.

[10] Garnett D. Electrically charged storm cells: A mechanism for the transport of metals to the surface over buried sulphide deposits[R]. Australia: 19th International Geochemical Exploration Symposium, 2004.

[11] Kristiansson K, Malmqvist L, Persson W. Geogas prospecting: A new tool in the search for concealed mineralizations[J]. Endeavour, 1990, 14(1): 28−33.

[12] Ryss Yu S, Goldberg I S. The partial extraction of metals (CHIM) method in mineral exploration[J]. Method and Technique, ONTI, VITR, Leningrad, 1973, 84: 5−19.

[13] Mann A, Bajc J. The mobile metal ions (MMI) method for exploration through overburden[C]//Proceedings of the 13th International Geochemical Exploration Symposium. Sydney, 1994: 689-692.

[14] Goldberg I S, Ryss Yu S. Application of the INONEXSURVEY system in the exploration of blind sulfide deposits[R]. Moscow: All-Union Research Institute of Exploration Technology, 1997.

[15] Clark J R, Williams P J. The Enzymeleach technique for geochemical exploration in overburden[C]//Proceedings of the 11th International Geochemical Exploration Symposium. Vancouver, 1990: 567-570.

[16] 刘应汉, 张华, 孔牧, 等. 利用液态捕集剂的深穿透纳米物质测量方法及前景 [J]. 地质与勘探, 2002, 38(S1): 199−202.
Liu Y H, Zhang H, Kong M, et al. The method of using liquid carries out nanoscal material geochemical measuement and its future[J]. Geology and Exploration, 2002, 38(S1): 199−202.

[17] 张必敏, 王学求, 贺灵, 等. 内蒙古半干旱草原区隐伏矿地球化学勘查方法试验 [J]. 物探与化探, 2013, 37(5): 804−810.
Zhang B M, Wang X Q, He L, et al. Geochemical exploration for concealed deposits on semi-arid grasslands of Inner Mongolia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(5): 804−810.

[18] 高延光, 杨忠芳, 汪明启, 等. 青海黑河断陷盆地中浅覆盖区寻找隐伏矿地气普查方法技术研究 [J]. 地质与勘探, 2005, 41(4): 73−77.
Gao Y G, Yang Z F, Wang M Q, et al. Geogas reconnaissance technique in the search for concealed deposits in middle-shallow cover area, Heihe downfaulted basin, Qinghai[J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(4): 73−77.

[19] 黄学强, 罗先熔, 李彦伟, 等. 高原寒冷区地电化学方法寻找隐伏铜多金属矿研究——以青海尕大阪矿区为例 [J]. 地质与勘探, 2012, 48(2): 344−351.
Huang X Q, Luo X R, Li Y W, et al. Application of the geoelectochemical method to prospecting hidden copper-polymetallic ore in cold plateau areas: A case study of the gardaban mine in Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 2012, 48(2): 344−351.

[20] 董艳秋, 罗先熔, 李春阳, 等. 地电化学集成技术在青海多彩玛冻土带的找矿应用研究 [J]. 黄金科学技术, 2012, 20(2): 20−24.
Dong Y Q, Luo X R, Li C Y, et al. Application of electro-chemical integrated technology method for prospecting in Duocaima tundra, Qinghai Province[J]. Gold Science and Technology, 2012, 20(2): 20−24.

[21] 邱炜, 王富春, 罗先熔. 地电化学集成技术在青藏高原特殊景观区的找矿效果及其异常与矿体产状的关系 [J]. 物探与化探, 2013, 37(3): 377−381.
Qiu W, Wang F C, Luo X R. The application of the geo-electrochemical integrated method to the ore-prospecting work in special landscape areas of the Tibetan Plateau and the relationship between anomaly and ore occurrence[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(3): 377−381.

[22] 高杨, 罗先熔, 朱佳玲, 等. 地球电化学提取法在高原寒冷区寻找隐伏金矿——以青海格尔木西藏大沟地区为例 [J]. 桂林理工大学学报, 2017(2): 274−279.
Gao Y, Luo X R, Zhu J L, et al. Geo-electrochemical extraction method for concealed gold deposits in cold plateau district: A case from Xizang ditch in Geermu, Qinghai[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017(2): 274−279.

[23] 贾金富. 中国主要景观区区域地球化学勘查理论与方法 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.
Jia J F. Theory and method of regional geochemical exploration in main landscape areas of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

[24] 徐进力, 邢夏, 张鹏鹏, 等. 元素活动态提取条件和分析方法的应用研究 [J]. 地质学报, 2020, 94(3): 982−990.
Xu J L, Xing X, Zhang P P, et al. Application research on extraction conditions and analysis methods of active state elements[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 982−990.

[25] 王学求, 姚文生, 孙爱琴, 等. 贱金属元素活动态的提取剂、制备方法及提取方法 [P].中国专利, CN102787235B, 2014-08-27.
Wang X Q, Yao W S, Sun A Q, et al. Extractant, preparation method and extraction method of active state of base metal elements [P]. Chinese Patent, CN102787235B, 2014-08-27.

[26] Kelly D L. An investigation of piedmont geochemical explo-ration techniques for buried porphyry copper deposits,part 1:Soil geochemistry and biogeochemistry[C]//BHP Minerals Re-porz,1995.

[27] 王学求, 叶荣. 纳米金属微粒发现——深穿透地球化学的微观证据 [J]. 地球学报, 2011, 32(1): 7−12.
Wang X Q, Ye R. Findings of nanoscale metal particles: Evidence for deep-penetrating geochemistry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(1): 7−12.

[28] Thanh N T, 刘修国, 陈春亮, 等. 基于稳健统计学和 EDA 技术的地球化学异常下限确定 [J]. 物探化探计算技术, 2013, 35(3): 307−313, 249.
Thanh N T, Liu X G, Chen C L, et al. Robust statistics and eda technique for identification of the geochemical anomalies[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 35(3): 307−313, 249.

Application and demonstration of deep-penetrating geochemical exploration techniques in alpine shallow overburden areas

MA Ying[1], HUANG Qiang[1], NIU Yao[1], SUN Bin-Bin[2], ZHANG Hao[1], ZHANG Jian-Ping[3], MA Ning[4], SHUI Ying-Dong[5], YE Jian-Hu[1]

(1. *No. 5 Exploration Institute of Geology Resources of Qinghai Province*, *Xining* 810003, *China*; 2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Tianjin* 300300, *China*; 3. *No. 3 Exploration Institute of Geology Resources of Qinghai Province*, *Xining* 810029, *China*; 4. *The Third Nonferrous Geological Exploration Institute of Qinghai Province*, *Xining* 810000, *China*; 5. *Nuclear Industry Radioactive Geological Exploration Institute of Qinghai Province*, *Xining* 810003, *China*)

Abstract: This study aims to address the technical challenges in exploring concealed ore bodies in alpine shallow overburden areas. Hence, it conducted the application test and demonstration of deep-penetrating geochemical exploration techniques in two typical landscape areas: the low-to-middle mountainous desert steppe and the alluvial-proluvial gravelly Gobi along the periphery of the Qaidam Basin. The results show that the proportions of fine-grained ($d \leqslant 96$ μm), micro-fine-grained ($d \leqslant 20$ μm), and ultra-fine-grained ($d \leqslant 5$ μm) materials in the overburden serve as the core basis for evaluating the effectiveness and adaptability of deep-penetrating geochemical exploration techniques. Through the multi-technique effectiveness tests conducted in the Relong and Yuka gold deposits, the differences in application efficiency of various techniques across different landscape areas were clarified. The measurement of micro-fine-grained soils was employed for a large-scale demonstration application, with the delineated anomalies highly coinciding with the known mineralized zones. Moreover, a concealed ore body with a gold grade of up to 3.85 g/t was discovered in the Relong gold deposit. Finally, a three-level technical combination, consisting of regional reconnaissance, anomaly verification, and ore body positioning, was proposed for alpine shallow overburden areas. Overall, the results of this study provide technical support for the exploration of concealed ore bodies in similar areas.

Key words: alpine shallow overburden area; deep-penetrating geochemical exploration; periphery of the Qaidam Basin

(本文编辑: 蒋实)