



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406692

引用格式:钟鹏飞,吕川,赵奇峰,等.伽玛能谱组合参数在火山岩地区金多金属找矿中的应用[J].科学技术与工程,2025,25(19):7930-7940.

Zhong Pengfei, Lü Chuan, Zhao Qifeng, et al. Application of combined γ -ray spectral parameters in gold polymetallic prospecting in volcanic areas[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(19): 7930-7940.

伽玛能谱组合参数在火山岩地区 金多金属找矿中的应用

钟鹏飞^{1,2}, 吕川¹, 赵奇峰¹, 张云龙¹, 陈昌¹, 彭柏鑫¹, 许文军¹, 吴彪¹

(1.核工业二七〇研究所,南昌 330200; 2.中国地质学会华东放射性矿产勘查技术创新基地,南昌 330200)

摘要 研究区位于钦杭成矿带中段的东乡火山盆地,已探明有多个金铅锌为主的矿点及矿化点。基于“由已知到未知”的原则,结合激电中梯测量和土壤地球化学等综合物化探成果,对比分析桥西(HS-1)和欧家(HS-2)两地区伽玛能谱组合参数特征,认为地面伽玛能谱特征参数异常中心较土壤地球化学测量得到的异常更为集中,在K蚀变带中,F参数与异常呈正相关,在Na化蚀变带中,N参数与异常呈正相关;并推测HS-2地区具有相对较好的金多金属找矿前景。研究结果为火山岩地区的单元与超单元划分提供了新的理论依据,证明在实际工作中,应该综合分析区内的地质情况和特征,确定合适的组合参数来间接解释地区成矿蚀变性质或原因,较传统单一元素的能谱研究更具指导意义。

关键词 火山岩型;金多金属矿;钦杭成矿带;伽玛能谱组合参数特征

中图法分类号 P619.14;

文献标志码 A

Application of Combined γ -ray Spectral Parameters in Gold Polymetallic Prospecting in Volcanic Areas

ZHONG Peng-fei^{1,2}, LÜ Chuan¹, ZHAO Qi-feng¹, ZHANG Yun-long¹, CHEN Chang¹,

PENG Bai-xin¹, XU Wen-jun¹, WU Biao¹

(1. No. 270 Research Institute of Nuclear Industry, Nanchang 330200, China;

2. Innovation Base for Radiometric Mineral Exploration Technology of East China, Geological Society of China, Nanchang 330200, China)

[Abstract] The study area is located in the Dongxiang Volcanic Basin in the middle part of the Qin-Hang mineralization belt, where several gold-lead-zinc (Au-Pb-Zn)-based mineralization and mineralization sites have been detected. Based on the principle of “from the known to the unknown”, combining the results of physical and chemical exploration, such as the excitation middle gradient measurement and soil geochemistry, the characteristics of the combined parameters of the gamma spectra of Qiaoxi (HS-1) and Oujia (HS-2) was compared and analyzed, it was concluded that the anomaly centers of the characteristic parameters of the ground γ -ray were more concentrated than those of the anomalies obtained from soil geochemistry measurements. It was believed that the anomaly centers of the ground γ -ray energy spectral parameters were more concentrated than those of the soil geochemical measurements, and the F parameters were positively correlated with the anomalies in the K alteration zone, and the N parameters were positively correlated with the anomalies in the Na chemotaxis zone; and it was hypothesized that the HS-2 area has a relatively good prospect of gold polymetallic prospecting. The results provides a new theoretical basis for unit and super-unit delineation of volcanic areas, and proves that in practical work, the geological situation and characteristics of the area was comprehensively analyzed, and the appropriate combination of parameters was determine to indirectly explain the nature or cause of mineralized alteration in the area, which is more instructive than the traditional single-element spectral study.

[Keywords] volcanic rock type; gold polymetallic ore; Qin-Hang metallogenic belt; characterization of the combined parameters of the γ -ray spectrum

研究表明,地壳中岩石的放射性元素铀、钍、钾含量分布差异显著^[1-2]。在热液作用下,这些元

素随着热液的碱性向中性和酸性演化而变化。具体来说,随着温度的降低,铀和钍会分离,而金则

收稿日期:2024-09-05 修订日期:2024-12-23

基金项目:中国核工业地质局项目(2023-293)

第一作者:钟鹏飞(1994—),男,汉族,江西吉安人,助理工程师。研究方向:放射性地球物理勘查。E-mail:253888187@qq.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

明显富集并形成矿化。然而,不同的成矿热液在不同的围岩和构造条件下会导致不同的围岩蚀变,进而造成铀(U)、钍(Th)、钾(K)三元素在构造蚀变岩及其矿体内的含量差异。如乌兹别克斯坦西部穆龙套金矿田的所有金矿床中,在热液蚀变带范围内都出现铀和钾异常,这些异常都靠近金;苏联霍茨克·楚科特火山岩金矿床,钾含量显著上升,铀和钍元素发生迁移并流失,利用此规律进行找矿工作,取得了显著成果^[3-4]。因此,通过测量找金地质体中铀、钍、钾的含量及其比值的异常来指示含金蚀变带的存在,进而指示金矿体的赋存部位。基于伽玛能谱法在矿产勘探中的宝贵经验和启示,为探索与分析研究区内主要金铅锌点深部及其近围的找矿前景,在区内的HS-1和HS-2地段部署了激电、地面伽玛能谱测量和土壤地球化学测量等工作,旨在结合其他物化成果的基础上,运用伽玛能谱组合参数异常特征来进行找矿预测,为类似地区金-多金属矿寻找做了可供借鉴的有益尝试。

1 地质概况

如图1所示为钦杭成矿带是中国重要的多金属成矿带^[5]。研究区位于钦杭成矿带中段东乡火山盆地欧家—桥西地区,区内经历多次构造-岩浆作用,发育一系列断裂、构造以及中酸性火山-侵入杂岩。地层自下而上主要由打鼓顶组(K_1d)和鹅湖岭组(K_1e)火山旋回组成,岩性主要为凝灰质砂岩、熔

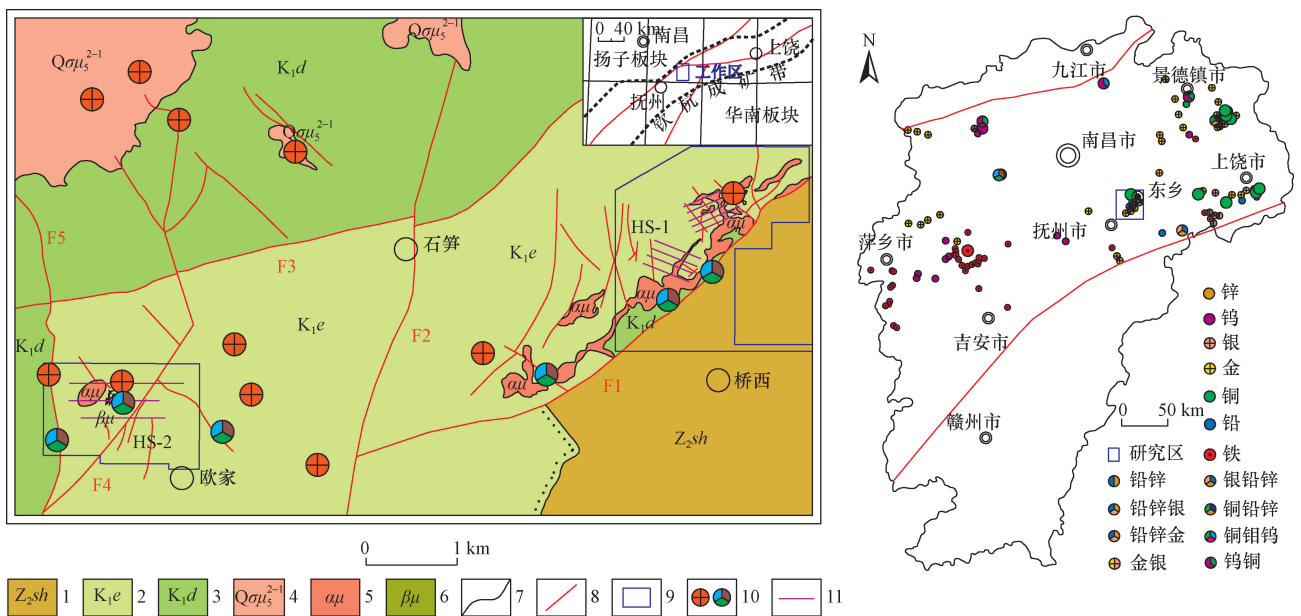
结凝灰岩、角砾凝灰岩、凝灰集块岩等;其次在东南部边缘分布震旦系尚源组(Z_2sh)变质岩系,岩性为变质砂岩、绢云母千枚岩、石英片岩等。次火山岩体主要发育有石英闪长玢岩($Q\sigma\mu_5^{2-1}$)与安山玢岩($\alpha\mu$)。空间上,石英闪长玢岩由北向南侵入打鼓顶地层中,安山玢岩呈串珠状沿北东向深大断裂F1与派生的次级断裂产出,其他地区出露较少。研究区已发现主要为金铅锌矿体,与中酸性次火山岩、侵入岩的关系密切,多位于断裂与安山玢岩体附近,具有较好的多金属成矿条件^[6]。

区内岩浆岩的放射性和含金性具有明显的差异(表1),由酸性岩到基性岩,含量逐渐降低,而金含量则逐渐增高。文献[7-8]对区内石英闪长玢岩、英安玢岩、安山玢岩等中酸性岩浆岩进行研究^[6],结果显示次火山岩(安山玢岩)中金元素明显低于中酸性岩维氏值(表2),反映岩浆中金铜多金属元素大部分进入成矿热液中^[7-8]。多金属矿体在空间上分布受岩浆活动、火山及构造作用和地层等因素影响,主要赋存于北东向、北北东向断裂上盘夹持中的近南北向断裂带中。已发现的多金属矿体所处的空间位置均位于后期安山玢岩、石英斑岩接触带或前峰,主要为中低温热液地质活动^[9]。

2 理论基础及数学模型

2.1 特征参数应用的理论基础

围岩蚀变指在围岩受到流体和热液的作用影响



1 为前震旦系板溪组千枚岩;2 为早白垩系鹅湖岭组;3 为上侏罗系打鼓顶组;4 为石英闪长玢岩;5 为安山玢岩;6 为橄榄玄武玢岩;7 为地质界线;8 为断裂;9 为研究区;10 为金、铅锌铜矿(化)点;11 为激电中梯测线

图1 研究区区域地质简图

Fig. 1 Geologic sketch of the study area

表1 岩浆岩与区内安山玢岩中铀钍钾和金的平均含量

Table 1 The average contents of uranium, thorium, potassium and gold in magmatic rocks and andesite porphyrite in the area

岩石	Th/ 10^{-6}	U/ 10^{-6}	K/%	Th/U	K/U	Th/K	Au/ 10^{-8}
超基性岩	0.02	0.007	0.01	2.8	1.4	2.0	6.6
基性岩	3.4	0.8	1.0	4.3	1.3	3.4	4.8
中基性岩	6.1	1.7	1.9	3.6	1.1	3.2	—
中性岩	9.8	3.0	2.4	3.3	0.8	4.1	3.2
中酸性岩	16.0	3.6	3.0	4.4	0.8	5.3	—
酸性岩	21.9	4.1	3.5	5.3	0.9	6.3	1.7
地壳	13.0	2.5	2.5	5.2	1.0	5.2	3.5
安山玢岩	16.6	3.3	4.6	4.6	1.3	3.6	0.21

表2 研究区次火山岩成矿元素含量

Table 2 Mineralizing element content of subvolcanic rocks in the study area

元素	石英闪	橄榄玄	英安	安山	维氏值 (1962年)
	长玢岩	武玢岩	玢岩	玢岩	
Au/ 10^{-9}	2	2	1.98	2.1	4
Ag/ 10^{-9}	100	100	110	85	70
Cu/ 10^{-6}	22	40	23	30	47
Pb/ 10^{-6}	23	20	25	32	16
Zn/ 10^{-6}	68	100	70	85	83

所发生的各种交代变质作用,蚀变围岩常具有分带现象,这是建立交代蚀变成矿模式的重要基础^[10]。在过去的研究中,学者们普遍发现碱交代岩是释放矿质并提供矿源的重要地质体,而对于许多基性→中性→中酸性同熔岩浆化序列,一般是早期 Na > K,中期 Na ≈ K,晚期 K > Na 或至少有 Na 减 K 增的趋势^[11]。含矿热液迁移过程中与围岩发生相互作用形成一系列的蚀变和矿化分带,热液中金属元素在有限空间内沉降集中,继而围岩由中心向外围 K 含量应呈降低趋势。在“碱质交代成矿模式”的研究中,提出了一个以钾交代为主导的过程,从强基(K)向较弱的基(Li)或氢交代的发展过程。这一过程涉及钾长石化和钠长石化等多个阶段,其中钾长石化带的下部是各种成矿元素的活化转移带,成为富集区,因此,一般认为 K₂O 含量与成矿元素丰度之间存在正相关关系,即 K₂O 含量越高,成矿条件越有利^[12]。而实际上钠质交代作用与钾质交代作用在成矿过程中都有其独特的作用和贡献,只是钾质交代作用通常占据更主导地位^[13]。

前人发现区内 K₂O 与 Na₂O 含量呈现负消长关系,并指出这一关系导致同一地层的蚀变特征出现显著差异。根据余达淦等^[14]的研究,南岭构造区和钦-杭构造区的小岩体表现出高钠(磷、氟)和高 Li 的特征,并伴随着钠交代和云英岩化现象,而在稍晚的时期(145~95 Ma),K 型碱质岩浆-流体活动兴起,此时的小岩体以高钾为特征,并伴有 U、Pb、Zn

和 Ag 矿化。交代作用与铀多金属富集之间存在内在关系,这些蚀变在构造部位形成以钾化、云母化为主的近矿围岩蚀变^[15-17]。在 HS-1 地区,次火山岩广泛分布,主要的钾质交代岩类包括水云母化、黄铁矿化和钾化。而在 HS-2 地区,矿体围岩蚀变主要包括叶腊石化、孔雀石化和硅化。本文中采用 *N*、*F* 参数来探讨同一地层中不同蚀变与金多金属成矿之间的联系。

2.2 组合参数数学模型

在岩石学研究中,侵入体的年代划分和成因解释至关重要。放射性同位素的衰变序列用于确定地质体年龄,而侵入体的放射性元素含量与其形成时代的地质背景直接相关^[18]。伽玛能谱测量技术是分析侵入体放射性元素含量的关键手段,有助于侵入体的单元与超单元划分^[19]。研究表明,同一时代的不同侵入体或不同时代的同种侵入体在放射性元素含量上存在显著差异,这些差异反映了它们形成时的不同地质环境和岩浆源区特性^[20]。因此,放射性元素含量的差异成为划分侵入体单元与超单元的重要依据。在综合前人研究成果的基础上^[21-27],通过收集和整理不同地区、不同年代的侵入体数据,并运用数理统计方法进行量化分析,构建了伽玛能谱多元素组合参数的数学模型,并深入探讨其地质意义(表3)。

3 仪器与方法

3.1 地面伽玛能谱

数据采集使用上海申核仪器厂的 FD-3022-I 型便携式多道伽玛能谱仪,仪器使用前于国防 1313 二级计量站进行检定,工作期间严格按照《地面伽玛能谱测量规范》(EJ/T 363—2012)对仪器进行“稳定性、一致性、涨落性”检查,检查结果均符合规范要求。野外工作采用 1:10 000 比例尺,100 m × 40 m 网格进行面积测量,测量时间 60 s,共采集测点 3 491 个。对采集到的数据分别按照 *F*、*N* 参数模型计

表3 伽玛能谱多元素组合参数数学模型及地质意义

Table 3 Mathematical model and geological significance of multi-element combination parameters of γ -ray spectrum

方法类型	参数	数学模型	目的及地质意义
单元素	铀	eU	研究 eU、eTh、K 元素的区域分布趋势和变化规律,对比不同元素含量差异,从而得到有用的地质找矿信息
分布趋势	钍	eTh	
(常规方法)	钾	K	
比值 (常规方法)	铀钍比	eU/eTh	研究地层和岩石中放射性核素在地质、地球化学及地球物理作用过程中动态平衡破坏状况,也是建立其他能谱信息参数的基础。其中,eU/K 的高低反映了以钠交代作用为主的另一种蚀变现象,K/eTh 有突出钾化热液蚀变的作用,K/eU 有突出蚀变中心的作用
	铀钾比	eU/K	
	钍钾比	eTh/K	
	钍铀比	eTh/eU	
	钾钍比	K/eTh	
	钾铀比	K/eU	
多元素组合参数 (增强方法)	古铀量	$U_g = Th / (eTh/eU)$	利用 eTh 元素相对稳定的性质间接反映测区原始铀当量含量,高值区指示并圈定原始状态下的铀源层(体)
	活化铀迁移量	$\Delta U = U - U_g$	用现今测量铀与“古铀”之间的差异表征铀元素在成岩后期活化迁移的数值。利用区域内 ΔU 的平均值或变化趋势,对测区内的铀元素淋滤或叠加富集的状况进行评价,了解古铀及现今测量铀之间的差异及变化值,评价铀在区域上的活化迁移量
	相对变迁系数	$B = (eTh/eU) / (eTh/eU)$	探讨低背景情况下铀元素的相对迁移状况,了解测区后期改造铀元素活化迁移规律
	铀丰富程度指数	$U_A = eU \times K/eTh$	着重了解原始状态下铀的丰富程度及叠加富集状况
	铀改造程度指数	$U_B = eTh \times K/eU^2$	利用该参数表征铀的改造条件与程度,圈定铀淋滤区范围
	铀迁移富集系数	$U_C = eU^3 / (eTh \times K)$	沉积盆地中 eU/eTh、eU/K 增高表明该地段存在铀的后期活化迁移富集,在原有高 eU 含量的铀源层,形成叠加后生富集。了解铀元素在地球化学作用下迁移并相对富集的情况
	铀迁移系数	$U_{qv} = 1 - U_h/U_g$	$U_{qv} > 1$: 表征测点有铀迁入、富集; $U_{qv} < 1$: 表征测点有铀迁出
	地球化学 活动性指数	$TF = eU \times K/eTh^2$	进行地球化学作用分区并推测可能存在的地球化学作用变异带(氧化还原过渡带)
	钍归一化	$K_d = K - A + B \times \lg Th$ $U_d = eU - A' + B' \times eTh$	Th-K 与 Th-U 回归方程对钍进行归一化,消除测量结果中非矿化因素干扰,突出与矿化有关的元素运移信息,A、B、A'、B' 分别为方程中的回归系数
	碱交代蚀变 参数	F 参数 = $eU \times K/eTh$ N 参数 = $eU \times eTh/K$ H 参数 = R_n/γ $U_{Gi} = (K/eTh)(K/eU)$	eU/eTh 主要与岩浆岩物质成分或不同温度热液有关,用 eU/eTh 归一 K 元素,突出中低温钾化蚀变带 用 eTh 与 K 含量变化冲突,突出 K 低值带,多反映 Na 化蚀变带 R_n 为深部叠加地表矿体信息, γ 为地表核素信息,用以突出深部矿体 同时突出热液蚀变和蚀变内带的作用
初始铀含量	G 参数 = $eTh \times (eU/eTh)_m$	依据钍元素的稳定性,大体计算各地层、岩体形成时的初始铀含量,用以反应铀源条件。(eU/eTh) _m 为区域 eU 与 eTh 平均值的比值	
综合评价	综合相关系数	$S_k = \sum_{i=1}^p X_{ik} h_i$	利用 p 种处理方法所得到的测量结果 X_{ik} 及其权重系数 h_i , 求取被测对象的融合信息,可以对被测对象进行更全面的综合评价。找矿地区综合评价系数定量化的高低一般是根据该区已知矿床(点)的综合评价系数确定,权重系数的大小根据成矿因素确定

算单点数据,然后使用 surfer25 软件的 Kriging 方法对数据进行网格化成图^[28]。

3.2 激电中梯剖面测量

数据采集选用的仪器为重庆地质仪器厂生产的 DZD-6A,供电导线采用专用供电导线,电阻小于 $10 \Omega \cdot m/km$,绝缘电阻每千米大于 $20 M\Omega/500 V$ 。AB 供电电极使用不锈钢钎状电极。测量电极 MN 均使用不极化电极,内阻小于 $2 k\Omega$,极差小于 $2 mV$ 。AB 极距 $1600 m$,点距为 $40 m$,布置测线 12 条,采用一线供电多线测量(最大旁侧距 $250 m$),测量周期为周期 $32 s$ 、延时 $80 ms$,反演深度 $300 \sim 400 m$,

共完成剖面测点 325 个,质检点 10 个,其中视电阻率均方相对误差为 4.6% ,工作区内的极化率均小于 3% ,视极化率总均方误差为 0.11 ,证明数据真实可靠。

3.3 土壤地球化学测量

工作采用 $200 m \times 40 m$ 网度,HS-1 测线 330° ,HS-2 测线为 90° ,共采集土壤样品 1650 件,样品送核工业二七〇研究所分析测试中心进行分析,在满足相关规范要求的准确度、精密度、检出限的前提下,采用 Pb、Zn、Mo、W、Sn、Sb 的分析方案,各元素报出率大于 90% 。分析数据先使用 SPSS 进行正态

分布检验,针对不符合正态分布的数据采用数理统计方法,按算术平均值加(减)3倍标准差反复剔除离群数据,利用 $T = X + KS$ (T 为某元素异常下限, X 为该元素平均值, K 为系数, S 为该元素标准偏差)计算各元素异常下限。为了量化表述研究区构造地球化学基本特征,选择以下参数^[29-31]。

(1) 变异系数 C_v [$C_{v1} = (S_1/X_1) \times 100\%$ 、 $C_{v2} = (S_2/X_2) \times 100\%$]:以元素原始含量求得的变化系数为 C_{v1} ,经 $X_1 \pm 3S_1$ 剔除异常值并符合正态分布后求得的变化系数为 C_{v2} ,反映元素含量的集中与分散程度。

(2) 富集系数 K :研究区构造地球化学元素算术平均值 X_1 与赋矿围岩中相应元素平均含量 C 比值。从正常围岩到构造带微量元素的含量上升程度,可在一定程度上反映研究区构造中元素富集程度。

(3) 致矿系数 Z_x :反映土壤中某种元素或化合物对成矿作用贡献大小的指标。通常用于评估土壤中元素的富集程度和其指示成矿潜力的能力。其计算公式为

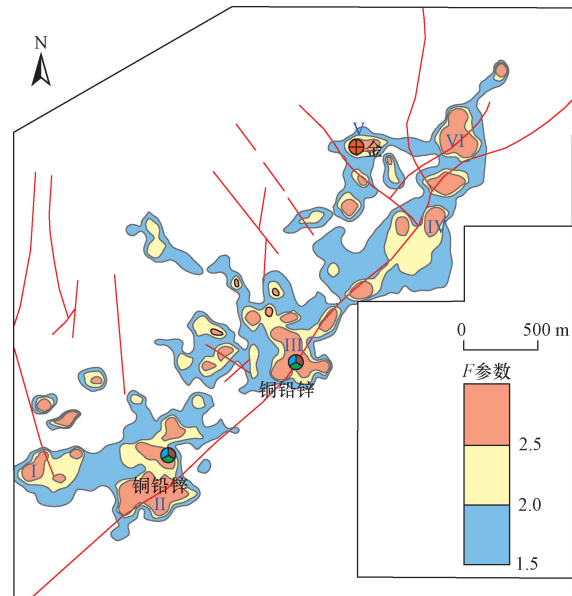
$$Z_x = \left(10C_{v1} + 10C_{v2} + \frac{100n}{N} + S_k + K_u \right) K + \frac{10}{\lg L} \quad (1)$$

式(1)中: C_{v1} 为原始数据的变异系数; C_{v2} 为背景数据的变异系数; N 为样本容量; n 为剔除样品数; S_k 为偏度; K_u 为峰度; K 为富集系数; L 为最低浓集系数。

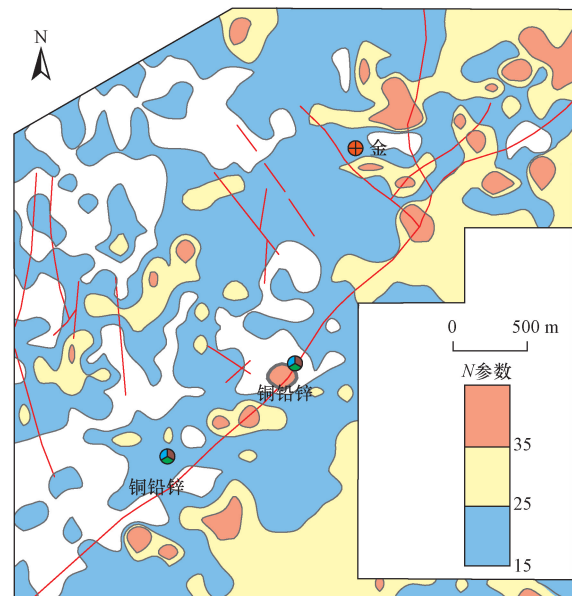
4 实例分析

4.1 HS-1 地区 N 、 F 参数异常特征

F 参数相比 N 参数更能反映区内的成矿关系。 F 参数异常特征主要呈条带状沿北东向断裂展布,在与构造交汇与岩体发育处往往形成极高 F 异常(图2)。 F 异常与土壤地球化学已发现 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等元素异常重叠。在 F 参数 ≥ 2.0 区域内,共发现 Au 异常点 66 个,异常最高值为 134.3 ng/g; Ag 异常点 39 个,异常最高值为 4.2 $\mu\text{g/g}$; Cu 异常点 16 个,异常最高值为 316 $\mu\text{g/g}$; Pb 异常点 43 个,异常最高值为 2 740 $\mu\text{g/g}$; Zn 异常点 11 个,异常最高值为 3 289 $\mu\text{g/g}$ 。对 I、II 号异常进行查证,发现向南西具有明显膨大、扩张的趋势,该异常区内主要岩性为安山玢岩、富钾粗安玢岩等,围岩蚀变主要为硅化以及钾化等。V、VI 号异常与 Au、Ag、Pb 土壤地球化学异常均吻合度极高。 F 参数异常总体有两个特征:①范围要大于土壤地球化学元素异常范围;②异常强度更高,异常峰也更为集中。但可以认为,实际测得的放射性异常往往是由构造破碎蚀变带和金多金属矿体叠加在一起的综合异常。



(a) F 参数等值晕图



(b) N 参数等值晕图

图2 HS-1 地区 F 参数、 N 参数等值晕图

Fig. 2 F -parameter, N -parameter equivalent contour map in HS-1

4.2 HS-2 地区 N 、 F 参数异常特征

图3可以看出,与HS-1地区的富钾岩性以及蚀变性质不同, F 参数不能显示区内的已知多金属矿化特征。由于多期次成矿作用,各期次矿化所引起的围岩蚀变相互穿插、重叠,导致HS-2分带性不明显。通过引入 N 参数突出 K 低值带,增强 Na 化蚀变带反应,共圈定 N 参数异常 7 片。可以看出,已发现的多金属矿点、矿化点与 N 参数 ≥ 35 吻合极好,对矿体的走向和形态控制明显。III、IV、V、VII 号异常均位于岩体、构造发育或构造夹持部位,晕圈规模较大,同时地面伽玛能谱与土壤地球化学发现了较好的铀、金多金属异常,其中最高: $eU = 15.6 \times 10^{-6}$,

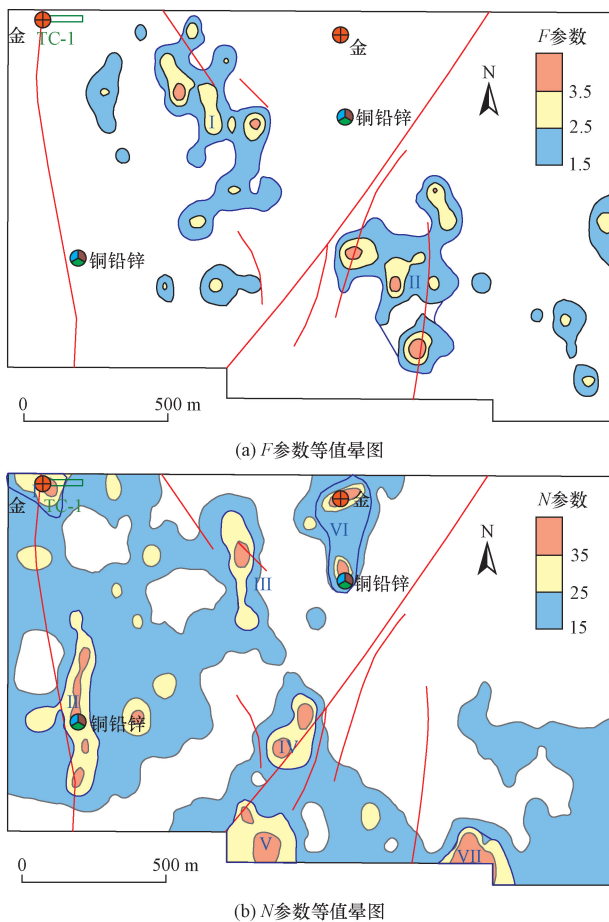


图3 HS-2地区 F 参数、 N 参数等值晕图

Fig. 3 F -parameter, N -parameter equivalent contour map in HS-2

$Au = 760 \times 10^{-9}$, $Ag = 627 \times 10^{-6}$, $Cu = 511.1 \times 10^{-6}$, $Pb = 694.2 \times 10^{-6}$, $Zn = 563.5 \times 10^{-6}$ 。由此可以推断, N 参数异常区可能是多金属矿体的反应。同时, N 、 F 参数显示, Na 、 K 二者异常分离, 为纯钠交代或纯钾交代, 一定程度上对铀、金多金属成矿有利。1号 N 参数异常施工探槽一个 (TC-1), Au 样品品位为 8.0×10^{-6} 。

4.3 激电中梯异常特征

图4所示为激电中梯测量剖面平面图。由图4可知, 视电阻率 ρ 最高为 $1649 \Omega \cdot m$, 视极化率 η 变化范围为 $0\% \sim 4.3\%$, 因 Au - Ag - Pb - Zn 矿体主要以脉状产出, 且覆盖层较厚, 地表能观测的视极化率值偏低, 整体而言属低极化背景区, 故本次工作以 $\eta = 1.5\%$, $\rho = 346 \Omega \cdot m$ 作为异常下限。根据异常形态, HS-1地区推测断裂构造9条, 分别为 $F1 \sim F9$, HS-2地区推测断裂构造7条, 编号 $F1 \sim F7$, 断裂位于多条大构造的夹持区域, 异常周围围岩蚀变主要为硅化、黄铁矿化、碳酸盐化, 部分为钾化。区内主要以高阻高极化模式为主, 其中HS-1地区有6条线性异常 ($G1 \sim G6$), HS-2地区有4条线性异常 ($H1 \sim H4$)。极化率异常形态受构造控制, 在构造

叠加岩体或岩性不整合界线上为多峰陡异常, 少量低阻高极化异常受断裂叠加火山侵入岩控制, 两种异常模式中均有已知矿体揭露, 其中以高阻高极化异常矿体为主。证明区内成矿作用与区域的岩浆活动具有明显的依存关系, 断裂以及次级构造为金多金属矿体的导、控矿以及容矿构造。

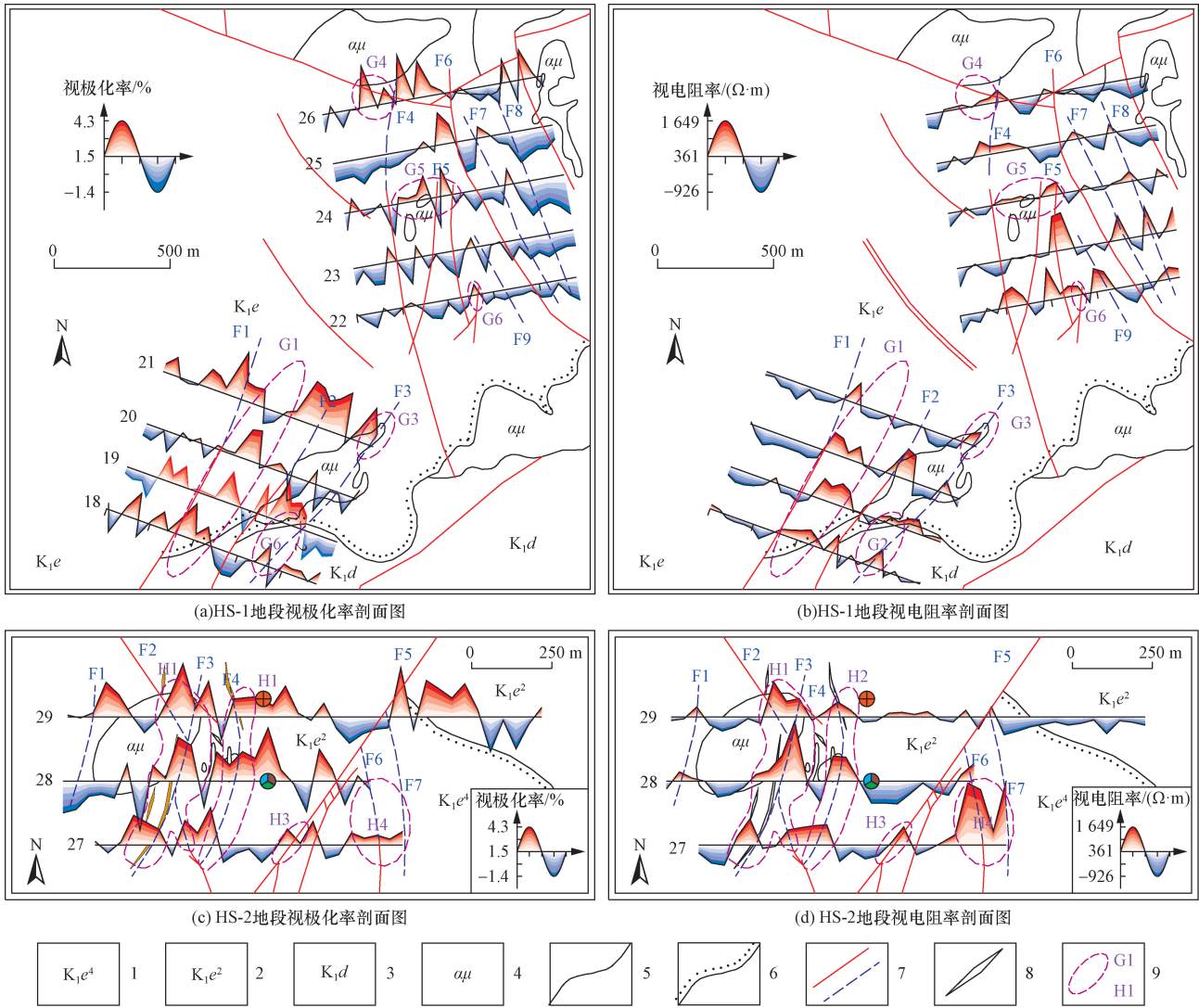
4.4 土壤地球化学异常特征

表4显示 Au 、 Ag 、 Pb 、 Sb 变异系数呈极不均匀, 原始变异系数 (C_{v1}) 分别达到 205.94% 、 141.72% 、 165.36% 、 100.76% 。说明这4种元素在区内的离散程度较高, 表明其在次生富集成晕过程中极易形成地球化学异常。迭代后基本消除原始数据中极高、极低值对离散程度的影响, 各元素的变异系数 (C_{v2}) 均小于1。可以看出: 区内 Au 高强数据最多, 成矿潜力最大, Pb 、 Ag 、 Mo 次之。富集系数显示 W 、 Au 、 Sn 、 As 、 Cu 、 Pb 、 Zn 元素富集程度高, 富集系数为 $4.38 \sim 8.38$ 。各项参数表明, 区内 Au 、 Pb 属强富集元素, 富集强度和富集能力均较高, 从致矿系数反应, Au 、 Ag 、 As 、 Pb 、 Sb 为重点成矿元素。

表5显示区内 Au 、 Mo 、 Pb 、 Ag 、 As 、 Zn 元素呈极不均匀状态, 其中 Au 变异系数达到 372.7% , 富集系数 $Au > Pb > Zn > As$, 说明这 Au 元素在区内的具有一定程度的迁移、富集, 表明其在次生富集成晕过程中极易形成地球化学异常。 C_{v1}/C_{v2} 表明 Au 元素在土壤中的次生富集能力和浓集强度较高, Ag 、 Cu 、 Zn 、 Pb 元素高强数据次之, 致矿系数也显示 Au 、 Pb 元素具有较好的成矿潜力。原始数据中, 10种元素算数平均值均高于华东南地块丰度值, 具有较好的成矿条件。从各项参数来看, 区内以 Au 、 Ag 、 Cu 、 Pb 、 Zn 为主要成矿元素异常。HS-1地段异常呈长轴走向沿北东向深大断裂展布, 异常受构造控制, 主要以单点极高异常出现 (图5), 相比来说, 图6显示 HS-2地段异常范围大, 发育多个 Au - Ag - Cu - Pb - Zn 三级浓集中心, 元素异常套合较好, 异常集中分布于断裂构造、岩体接触带及其附近。

4.5 特征参数分析

通过物化探异常分布可以看出, 金多金属矿化在空间分布上受岩浆活动、火山及构造作用和地层等因素影响, 与次火山岩体关系非常密切, 呈现不均匀的区块性分布。次火山岩体侵入及金多金属成矿作用自始至终又都是受到构造控制, 蚀变显示为硅化、绿泥石化、褐铁矿化等中低温为主的蚀变作用, 形成不同矿种组合、不同成因类型、不同阶段的矿化集中。 F 参数、 N 参数显示, 以断裂 $F2$ 为界, 在同一地区、岩性具有完全不一样的放射性特征。HS-1钾化发育在于受 $F1$ 深大断裂的影响, 成矿源区



1 为早白垩系鹅湖岭组第四段;2 为早白垩系鹅湖岭组第二段;3 为橄榄玄武岩;4 为安山岩;5 为地质界线;6 为不整合地质界线;
7 为实测、推测断裂;8 为含矿硅化破碎带;9 为高阻高极化激电异常及编号

图4 激电中梯测量剖面平面图

Fig. 4 IP ladder survey profile plan

表4 HS-1地区地球化学元素统计参数表

Table 4 Statistical parameters of geochemical elements in HS-1 region

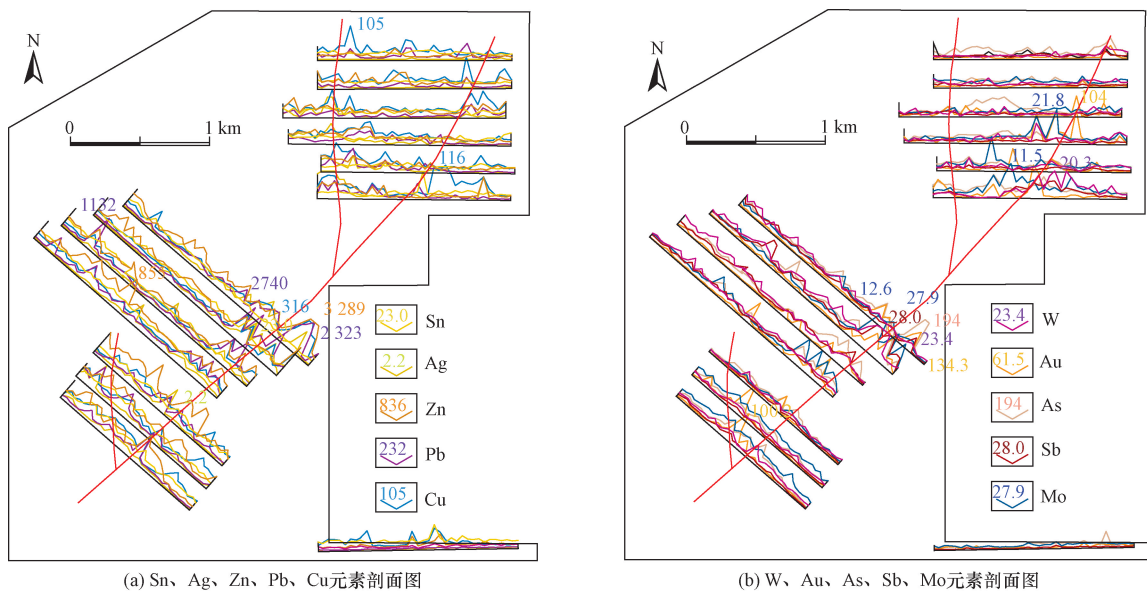
元素	原始数据			迭代后			C_{v1}/C_{v2}	致矿系数	富集系数	1S 外带	2S 中带	4S 内带
	X	S	C_{v1}	X	S	C_{v2}						
Au	5.1	10.5	205.9	2.5	1.4	53.3	3.86	25.0	3.2	3.89	5.24	6.59
Ag	0.3	0.4	141.7	0.2	0.1	61.5	2.31	19.0	3.0	0.24	0.33	0.42
As	22.2	17.6	79.2	19.3	8.7	45.3	1.75	20.1	9.6	27.99	36.72	45.45
Cu	28.9	19.8	68.6	26.3	12.3	46.5	1.47	10.4	1.1	38.59	50.84	63.09
Pb	118.8	196.5	165.4	76.0	47.2	62.0	2.67	23.0	3.8	123.22	170.40	217.58
Zn	225.6	209.4	92.8	208.3	120.4	57.8	1.61	11.5	2.8	328.62	448.98	569.34
Sb	2.9	2.9	100.8	2.3	1.4	58.9	1.71	23.5	11.0	3.65	5.00	6.35
Sn	6.2	2.7	43.0	6.0	1.7	28.5	1.51	8.8	3.3	7.71	9.42	11.13
Mo	2.2	2.1	94.2	1.8	0.8	44.0	2.14	15.0	2.5	2.56	3.34	4.12
W	4.3	2.9	65.8	4.0	1.9	48.5	1.36	11.9	3.0	5.87	7.79	9.71

注: Au 单位为 10^{-9} , 其他元素单位为 10^{-6} 。

表5 HS-2地区地球化学元素统计参数表
Table 5 Statistical parameters of geochemical elements in HS-2 region

元素	原始数据			迭代后			C_{v1}/C_{v2}	致矿系数	富集系数	1S 外带	2S 中带	4S 内带
	X	S	C_{v1}	X	S	C_{v2}						
Au	9.6	35.6	372.7	1.1	0.5	43.6	8.55	60.7	11.2	8.0	16.1	32.2
Ag	0.2	0.2	112.9	0.1	0.1	50.7	2.23	12.9	3.5	0.3	0.6	1.1
As	19.0	20.4	107.1	13.2	5.7	43.1	2.48	16.1	4.3	24.6	49.1	98.3
Cu	28.6	23.0	80.2	22.5	9.6	42.6	1.88	10.4	1.7	44.9	89.8	179.6
Pb	156.1	197.3	126.4	91.2	49.5	54.3	2.33	31.4	8.2	182.0	365.0	730.0
Zn	253.0	254.9	100.7	184.3	84.1	45.6	2.21	12.0	4.2	369.0	737.0	1 474.0
Sb	1.4	1.6	81.5	1.1	0.6	49.8	1.64	15.7	4.2	2.2	4.4	8.8
Sn	3.5	2.3	64.8	3.3	0.7	20.2	3.21	5.2	1.7	6.6	13.2	28.4
Mo	1.0	1.3	133.1	0.8	0.4	46.1	2.89	8.7	1.6	1.6	3.2	6.4
W	2.3	1.6	70.2	2.0	0.9	46.6	1.51	11.7	2.4	4.0	8.0	16.0

注: Au 单位为 10^{-9} , 其他元素单位为 10^{-6} ; Au 元素采用异常下限的 4、8、16 倍作为外、中、内带。



Au 元素的单位为 ng/g, 其他元素单位为 $\mu\text{g/g}$

图5 土壤地球化学平面剖面图

Fig. 5 Soil geochemical plane profile

是大陆地壳,在岩浆、构造侵入能够上侵到地壳浅部或形成火山机构,同时流体富集为 Au 元素为主的多金属矿。HS-2 地区较低的 F 参数值证明区内钾化不发育,可能是成矿深度太浅,流体容易冷却,易发生中低温蚀变。从碱交代成矿理论以及实际开采价值来说,HS-2 地区有较多以 Au 元素为主的土壤地球化学异常,与地电异常相互重叠,同时地表放射性特征反应有较好的成矿地质环境,证明 HS-2 地区有较好的浅部多金属找矿潜力。

5 结论

(1) 在欧家一桥西地区,岩浆活动频繁,导致了矿体沿着构造和次火山侵入分布。特别是在岩体侵入界面、火山构造和断裂构造的耦合区域,形成

了矿化的富集中心。安山玢岩的发育区域,显示出了更高的矿致元素异常强度和更广的影响范围,这是由于火山岩体的侵入所导致的。石英闪长玢岩分布区次之,而构造侵入所引起的矿致异常相对较弱,特富异常则主要出现在岩体与构造的交汇部位。

(2) 该区域内的地球化学异常主要以 Au、Ag、Cu、Pb、Zn 元素为主,这些元素通常以不同的组合出现。所有已知的矿体上都伴有 Au 元素异常,这表明 Au 是主要的指示元素。多元素异常的复合区域指示了矿化中心的位置。物探激电异常,特别是高阻高极化区,也是寻找金多金属矿的重要指示,这暗示了构造对矿体的控制作用。

(3) 此外,成矿地质条件、近矿围岩蚀变类型和多金属类型的不同,导致了地面伽玛能谱特征参数

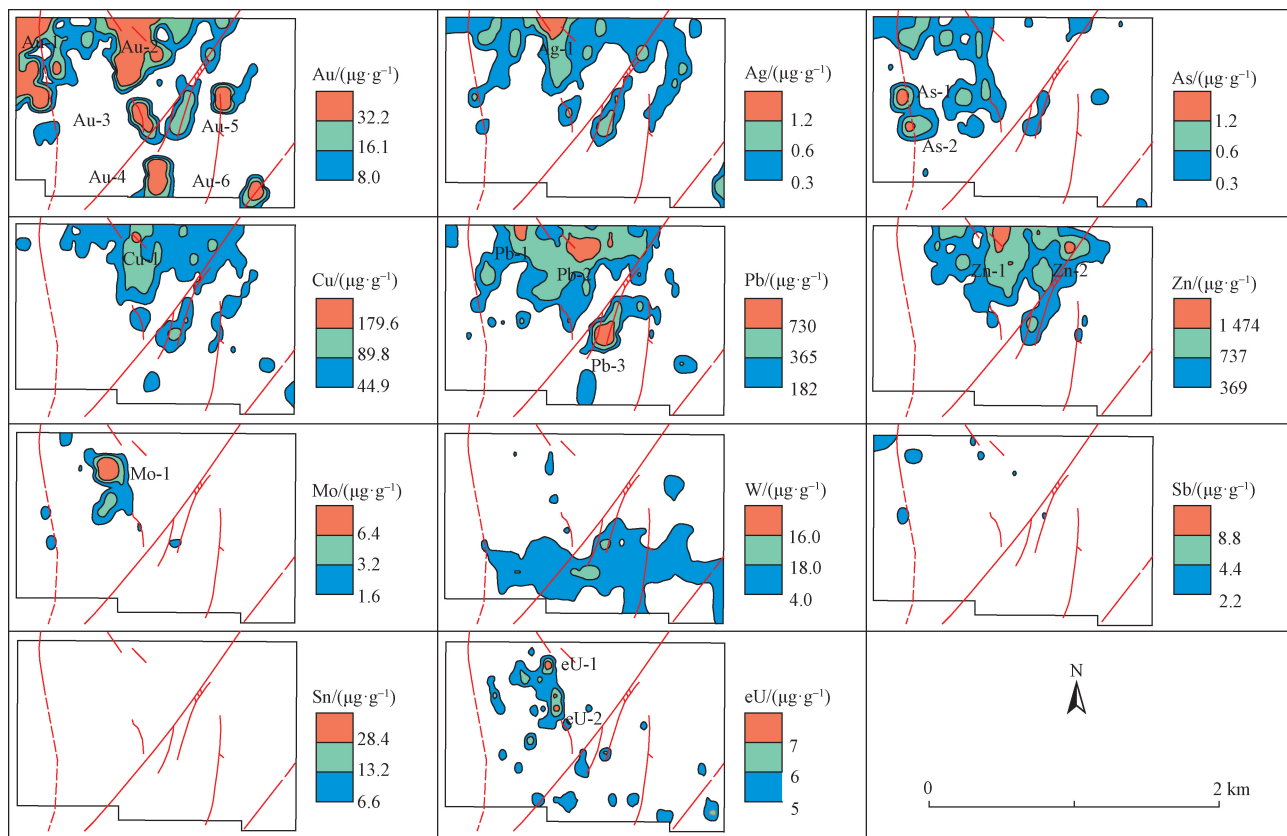


图6 土壤地球化学异常剖析图

Fig. 6 Soil geochemical anomaly profiles

的差异。通过分析这些参数,可以识别出伽玛能谱的特征标志,这些标志有助于指导金多金属矿的勘查。具体来说, F 参数和 N 参数分别用于指示钾质交代和钠质交代为主的地质体,而在钠质蚀变区域, Na_2O 含量也是一个重要的指标。

(4)综上所述,这些特征和参数为该地区的金多金属矿勘查提供了有力的指导,在HS-2地区具有相对较好的金多金属找矿前景。

参 考 文 献

[1] 卢树仁. 放射性能谱测量在稀有金属找矿中的探索[C]// 首届全国矿产勘查大会论文集. 廊坊: 河北省地球物理勘查院, 2021: 1-5.
Lu Shuren. Exploration of radiometric spectroscopy in prospecting for rare metals[C]// Proceedings of the First National Mineral Exploration Conference. Langfang: Hebei Geophysical Exploration Institute, 2021: 1-5.

[2] 丁江燕, 张新军, 曹志勇. 山西省临县紫金山地区U、Th、K三种放射性元素特征分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3460-3464.
Ding Jiangyan, Zhang Xinjun, Cao Zhiyong. Characteristics of three radioactive elements in U, Th and K in Zijinshan Region, Linxian County, Shanxi Province[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(9): 3460-3464.

[3] 刘池洋, 邱欣卫, 吴柏林, 等. 中-东亚能源矿产成矿域基本特征及其形成的动力学环境[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007

(S1): 1-15.
Liu Chiyang, Qiu Xinwei, Wu Bolin, et al. Basic characteristics and dynamic environment of energy mineral mineralization domain in Central and East Asia[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007(S1): 1-15.

[4] 何碧, 赵振培, 刘海生, 等. 东天山造山带黑尖山地区花岗闪长岩岩石成因及构造意义: 来自岩石学、锆石U-Pb年代学、地球化学证据[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10620-10634.
He Bi, Zhao Zhenguan, Liu Haisheng, et al. Petrogenesis and tectonic significance of late devonian granodiorite in Heijinshan Area, Eastern Tianshan Orogenic Belt: evidences from Petrology, Zircon U-Pb geochronology, and geochemistry[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10620-10634.

[5] 刘一, 骆学全, 张雪辉, 等. 钦杭Cu-Au-Pb-Zn-W成矿带(东段)主要地质成矿特征及潜力分析[J]. 地质学报, 2016, 90(7): 1551-1572.
Liu Yi, Luo Xuequan, Zhang Xuehui, et al. Geological characteristics of minerogenesis and prospecting in Eastern Qinzhou-Hangzhou Cu-Au-Pb-Zn-W metallogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(7): 1551-1572.

[6] 侯增谦, 杨志明, 王瑞, 等. 再论中国大陆斑岩Cu-Mo-Au矿床成矿作用[J]. 地学前缘, 2020, 27(2): 20-44.
Hou Zengqian, Yang Zhiming, Wang Rui, et al. Re-discussion on the metallogenic processes of porphyry Cu-Mo-Au deposits in Mainland China[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(2): 20-44.

[7] 饶峥, 赵立民, 潘永盛, 等. 江西石塘金矿床地质特征和金的赋存状态及对选矿工艺的指示意义[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(5): 1789-1798.

- Rao Zheng, Zhao Limin, Pan Yongsheng, et al. Geological characteristics and gold occurrence state and its indicative significance for mineral processing technology in Shiwu Gold Deposit, Jiangxi Province[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(5): 1789-1798.
- [8] 晏俊灵, 江俊杰, 张娟, 等. 江西省东乡火山岩区成矿地质、地球化学特征及找矿潜力[J]. 物探与化探, 2012, 36(4): 534-538.
- Yan Junling, Jiang Junjie, Zhang Juan, et al. Metallogenic geological and geochemical characteristics and ore-prospecting potential of Dongxiang volcanic area, Jiangxi Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 36(4): 534-538.
- [9] 刘守坚. 虎形山铅锌金矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 中国高新技术企业, 2012(13): 120-121.
- Liu Shoujian. Geological characteristics and prospecting potential analysis of Huxingshan lead-zinc gold deposit[J]. China High-Tech Enterprises, 2012(13): 120-121.
- [10] 杜乐天. 碱交代岩研究的重大成因意义[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 953-958.
- Du Letian. The important significance of alkali-metasomatic rock studies[J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 953-958.
- [11] 杜乐天. 碱交代成矿作用的地球化学共性和归类[J]. 矿床地质, 1983, 2(2): 33-41.
- Du Letian. Geochemistry of alkaline metasomatism[J]. Mineral Deposits, 1983, 2(2): 33-41.
- [12] 金露英, 秦克章, 李光明, 等. 斑岩铜-热液脉状铅锌银矿成矿系统特征、控制因素及勘查指示[J]. 岩石学报, 2020, 36(12): 3813-3839.
- Jin Luying, Qin Kezhang, Li Guangming, et al. Characteristics, controlling factors and exploration implications of porphyry molybdenum-hydrothermal vein-style lead-zinc-silver metallogenic systems[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(12): 3813-3839.
- [13] 疏孙平, 李秋根, 刘树文, 等. 斑岩型铜、金、钼矿床成矿成矿特征差异的原因和意义[J]. 地学前缘, 2018, 25(5): 237-250.
- Shu Sunping, Li Qiugen, Liu Shuwen, et al. The causes and significance of differences in diagenetic and metallogenic characteristics of porphyry copper, gold and molybdenum deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(5): 237-250.
- [14] 余达淦, 刘晓东, 巫建华, 等. 碱质热流体特征与成矿作用关系的剖析[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2): 274-275.
- Yu Dagan, Liu Xiaodong, Wu Jianhua, et al. Analysis of the relationship between alkaline thermal fluid characteristics and mineralization[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2013, 33(S2): 274-275.
- [15] 冯晓曦, 滕雪明, 耿建珍. 豫西卢氏五里川地区柳树湾铀矿碱交代成矿作用[J]. 地球科学, 2024, 49(4): 1189-1206.
- Feng Xiaoxi, Teng Xueming, Geng Jianzhen, et al. Influence of alkali metasomatic mineralization on Liushuwan Uranium Deposit in Lushi Wulichuan Area, West Henan Province[J]. Earth Science, 2024, 49(4): 1189-1206.
- [16] 邹明亮, 何大芳, 梁永东, 等. 钾交代的热力学计算及其与铀成矿关系讨论[J]. 铀矿地质, 2011, 27(1): 36-45.
- Zou Mingliang, He Dafang, Liang Yongdong, et al. Thermodynamic calculation of feldsparization and its relationship with uranium mineralization[J]. Uranium Geology, 2011, 27(1): 36-45.
- [17] 许健俊, 夏菲, 张熠阳, 等. 相山铀矿田鹏姑山地区热液蚀变地球化学特征及其对找矿的启示[J]. 岩石矿物学杂志, 2023, 42(4): 502-520.
- Xu Jianjun, Xia Fei, Zhang Yiyang, et al. Geochemical characteristics of hydrothermal alteration in Penggushan area of Xiangshan uranium ore field and its implications for prospecting[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2023, 42(4): 502-520.
- [18] 刘学龙, 陈建航, 李守奎, 等. 滇西北格咱铜多金属矿集区含矿斑岩、不含矿斑岩与全球埃达克岩对比研究[J]. 金属矿山, 2022(12): 147-156.
- Liu Xuelong, Chen Jianhang, Li Shoukui, et al. Comparative study of ore-bearing porphyry, ore-free porphyry and global Adakite in Geza copper polymetallic ore concentration Area, Northwest Yunnan Province[J]. Metal Mine, 2022(12): 147-156.
- [19] 付锦, 赵宁博, 裴承凯, 等. 中国铀、钍、钾元素地球化学场特征及与铀矿化关系[J]. 物探与化探, 2014, 38(2): 200-204.
- Fu Jin, Zhao Ningbo, Pei Chengkai, et al. Geochemical characteristics of uranium, thorium and potassium anomalies in China in relation to uranium mineralization[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(2): 200-204.
- [20] 蔡煜琦, 张金带, 李子颖, 等. 中国铀成矿规律与百年勘查成果及新一轮找矿突破行动建议——《中国矿产地质志·铀矿卷》研编[J]. 地球学报, 2025, 46(1): 52-68.
- Cai Yuqi, Zhang Jindai, Li Ziyang, et al. Metallogenic regularity, century's exploration results of uranium deposits in China, and suggestions for a new round of prospecting: research and compilation of "Geology of Mineral Resources in China · Uranium Deposits Volume"[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2025, 46(1): 52-68.
- [21] 付锦, 赵宁博, 裴承凯, 等. 中国花岗岩型铀矿区域地球化学指示元素特征及异常模式[J]. 世界核地质科学, 2013, 30(4): 217-223.
- Fu Jin, Zhao Ningbo, Pei Chengkai, et al. Geochemical indicator element characteristics and anomaly model of granite type uranium deposit in China[J]. World Nuclear Geoscience, 2013, 30(4): 217-223.
- [22] 周琪, 葛义林, 李玮俊, 等. 桂北地区铲子坪矿床伽玛能谱特征研究[J]. 世界有色金属, 2020(8): 278-281.
- Zhou Qi, Ge Yilin, Li Weijun, et al. Study on the characteristics of gamma energy spectrum of Jieziping deposit in northern Guangxi[J]. World Nonferrous Metals, 2020(8): 278-281.
- [23] 郝兴中, 孙斌, 张文, 等. 鲁西地区铁矿类型特征及成矿谱系[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 14988-15001.
- Hao Xingzhong, Sun Bin, Zhang Wen, et al. Characteristics of iron ore types and metallogenic pedigree in Western Shandong Province, China[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(35): 14988-15001.
- [24] 幸福成, 李志勇, 黄福学. 放射性物探方法在辽宁团山子地区金矿找矿中的应用[J]. 地质与资源, 2007(3): 218-221, 225.
- Xin Fucheng, Li Zhiyong, Huang Fuxue. Application of radiometric method in the prospecting for gold deposits in Tuanshanzi Area, Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2007(3): 218-221, 225.
- [25] 吴霖桐, 葛良全, 熊茂淋, 等. 铀矿勘查中航空伽玛能谱测量的特征参数和图像增强处理[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 31-43.

- Wu Jitong, Ge Liangquan, Xiong Maolin, et al. Characteristic parameters and image enhancement processing of airborne gamma-ray spectrometry survey in uranium exploration[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2025, 52(1): 31-43.
- [26] 王睿, 李占龙, 马涛. 放射性测量方法在稀有稀土矿勘查中的应用——以小兴安岭地区南岔区某铀异常点为例[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 854-861.
- Wang Rui, Li Zhanlong, Ma Tao. Application of radioactive prospecting in exploration of rare metal minerals: a case study of a uranium anomaly in the Nancha area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 854-861.
- [27] 刘永刚. γ 能谱谱数据分解方法研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- Liu Yonggang. Study on γ spectral data analysis methods[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [28] 梁旭东, 杨亚新, 罗齐彬, 等. 地面伽马能谱测量在鹿井铀矿田西部勘查中的应用[J]. 铀矿地质, 2023, 39(3): 446-459.
- Liang Xudong, Yang Yaxin, Luo Qibin, et al. Application of ground gamma spectrometry in the exploration of uranium in Western Lujing Ore Field [J]. Uranium Geology, 2023, 39(3): 446-459.
- [29] 智云宝, 魏正宇, 郝兴中, 等. 山东栖霞毕郭地区 1: 50 000 水系沉积物测量异常特征及找矿预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6327-6338.
- Zhi Yunbao, Wei Zhengyu, Hao Xingzhong, et al. Anomaly characteristics and prospecting prediction of 1: 50 000 stream sediment survey in Biguo Area, Qixia, Shandong Province[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(15): 6327-6338.
- [30] 何碧, 辛欢, 赵飞, 等. 黔北地区合山组硅质沉积物地球化学特征及其地质意义[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(26): 11321-11333.
- He Bi, Xin Huan, Zhao Fei, et al. Geochemistry data of siliceous deposits in Heshan Formation, Northern Guizhou Province[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(26): 11321-11333.
- [31] 樊新祥, 李省晔, 赵吉昌, 等. 甘肃北山双井子地区 1: 25 000 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, 2022, 22(36): 15938-15951.
- Fan Xinxiang, Li Shengye, Zhao Jichang, et al. Geochemical characteristics and prospecting prediction of 1: 25 000 stream sediments in Shuangjingzi Area, Beishan, Gansu Province[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(36): 15938-15951.