doi: 10.11720/wtyht.2026.1318
崔丽男, 潘伟, 刘春来, 等. 河北省崖门子地区土壤地球化学特征及银多金属矿成矿潜力[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 225-235. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1318
Cui L N, Pan W, Liu C L, et al. Soil geochemical characteristics and mineralization potential of silver-polymetallic deposits in Yamenzi area, Hebei Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 225-235. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1318

河北省崖门子地区土壤地球化学特征及银多金属矿成矿潜力

崔丽男, 潘伟, 刘春来, 崔伟, 冯贝贝
(河北省地质矿产勘查开发局第二地质大队(河北省矿山环境修复治理技术中心), 河北 唐山 063000)

摘 要: 崖门子地区位于华北板块北缘中段的燕辽成矿带内, 该带是我国重要的有色和贵金属成矿带, 具有较好的火山—次火山岩型银多金属矿成矿地质条件。为进一步优选找矿靶区并评价其找矿潜力, 本文在崖门子地区开展了 1∶1 万土壤地球化学测量工作。通过对测试的 12 种元素进行数理统计分析和衬度异常圈定, 得出 Ag、Pb、Zn、Au 是区内的主要成矿元素。根据成矿地质背景以及各元素异常套合情况, 共圈定出 5 个找矿靶区, 经探槽和钻孔工程验证后揭露到多条银铅锌矿(化)体。综合对比崖门子矿体与山西支家地银铅锌矿成矿模式, 二者具有相似特征, 因此进一步加强崖门子地区成矿规律研究有望找到更大规模的矿体。

关键词: 土壤地球化学特征; 火山-次火山岩; 银及多金属矿; 找矿潜力; 崖门子地区
中图分类号: P632; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)02-0225-11

0 引言

银, 除贵金属的属性外, 还具有较高的导电性、导热性、延展性和抗菌性, 在电子、珠宝及装饰品、货币、感光材料、医药抗菌等领域发挥着不可替代的作用[1-2]。随着新材料和新能源产业的快速发展, 银又被广泛应用在纳米技术及绿色能源等领域中, 成为高端电气应用和能源转型的重要支撑矿种。得益于银具有贵金属和工业金属的双重属性, 以及其在绿色能源中的广泛应用, 未来在国民经济和社会发展中, 银的作用和地位将显著提升[3]。然而, 随着银的大范围应用, 国内现有的矿产资源和再生资源已经无法满足经济社会发展的需要[4]。因此, 进一步加强银矿的勘查和开发是当前和今后需要解决的一项重要任务。

燕辽成矿带位于华北板块北缘中段, 是我国重要的有色和贵金属成矿带[5]。自五台期以来, 该带经历了多期次的构造运动和岩浆热液活动, 在河北北部形成了广泛出露的陆相火山岩—潜火山岩, 这些火山岩中 Ag 的丰度都比较高, 为 Ag 的迁移、富集和成矿提供了丰富的物质来源。迄今为止, 有多家地质单位在该区开展过地质找矿工作, 并发现了一大批与陆相火山—次火山热液活动有关的银矿(化)点和银矿床, 其中典型的代表有蔡家营铅锌银多金属矿[6-7]、牛圈—营房银多金属矿[8]、青羊沟—兰闫铅锌多金属矿[9] 和相广锰银矿[10-12] 等。

崖门子地区位于燕辽成矿带中部, 区内分布有 Ag-Pb-Zn 多金属矿化 (点)。20 世纪 70 年代以来, 前人在该区先后开展了 1∶20 万和 1∶5 万区域地质调查和水系沉积物测量工作, 获得了较为详细的地质地球化学数据。为进一步评价崖门子地区的找矿潜力, 并优选找矿靶区, 本次在崖门子地区开展了 1∶1 万土壤剖面测量工作。通过运用聚类分析、因子分析等数理统计方法, 确定主要成矿元素及其相互关系, 分析成矿元素的地球化学特征、空间分布规

收稿日期: 2025-09-11; **修回日期:** 2025-12-17
基金项目: 河北省地质勘查基金项目(冀自然资勘 [2024]075 号)
第一作者: 崔丽男(1987-), 女, 硕士研究生, 地球化学勘查高级工程师, 主要从事地球化学勘查方面的工作。Email: cuilinan67@163.com
通讯作者: 崔伟(1978-), 男, 本科, 正高级工程师, 主要从事固体矿产勘查工作。Email: cuiwei781015@163.com

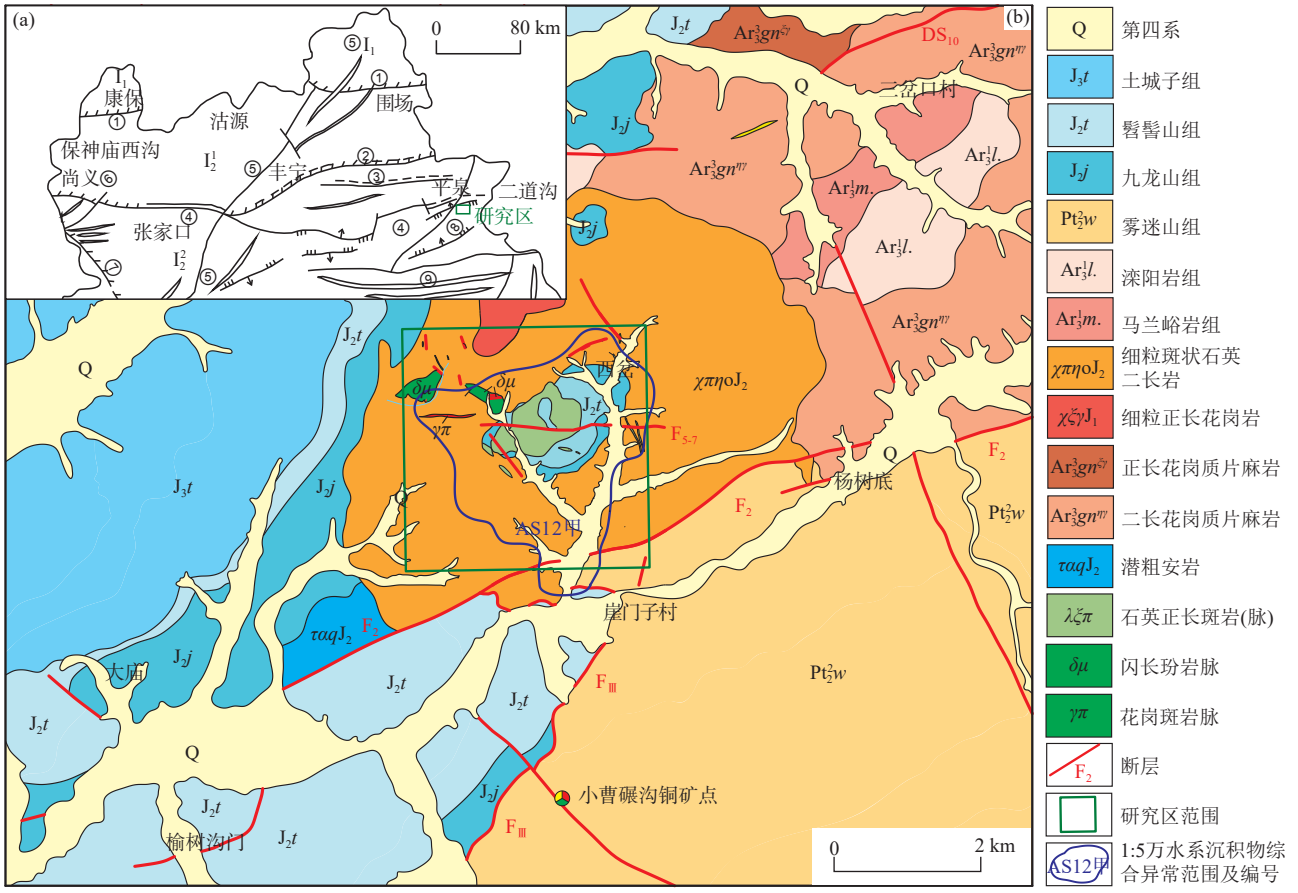
律并圈定异常，结合地质特征划分出找矿靶区并进一步分析成矿潜力[13]。

1　成矿地质背景

崖门子地区大地构造位置处于华北板块（I_2）北缘燕山构造活动带（$\mathrm{Ⅱ}_2^2$）内（图 1a）。区域上出露的地层主要有新太古代变质岩、中新元古代蓟县纪滨海相浅海相碳酸盐建造[14]。尚义—平泉区域性深大断裂从研究区北部通过，平坊—桑园大断裂从研究区东部通过[15-17]。区内中生代侵入岩及火山岩极为发育，燕山旋回火山活动频繁而强烈，呈多期次、多旋回性。1∶5 万水系沉积物测量圈定的综合异常 AS12 甲$_1$（崖门子）位于研究区内，异常面积 6.65 km^2，以 Ag、Cd、Pb、Zn 为主，伴有 Au、Mo、Bi、As、Sn、Sb 异常。该异常强度高、规模大，各元素异常套合较好。其中 Ag 异常面积最大，达 5.14 km^2，最高值 2.5×10^{-6}，异常呈不规则状，具内、中、外三级浓度分带，预测找矿潜力很大。

研究区内出露的地层有中新元古界蓟县系雾迷山组（Pt_2^2w），中生界侏罗系中统九龙山组（J_2j）、髫髻山组（J_2t）及新生界第四系（Q）。其中雾迷山组（Pt_2^2w）主要分布在研究区东南部，底部岩性主要为浅灰色厚层状白云质砾岩，向上为粉晶、细晶白云岩及燧石团块白云岩等；九龙山组（J_2j）分布在研究区中部，主要岩性为凝灰质角砾岩；髫髻山组（J_2t）分布于研究区中部，主要岩性为晶屑岩屑凝灰岩、凝灰质角砾岩，与研究区中心石英正长斑岩体呈侵入接触关系，与侏罗系九龙山组火山沉积地层呈平行不整合接触关系（图 1b）。

区内构造主要为断裂构造，方向以 EW 向和 NW 向为主，其中区域性断裂构造野猪河—平泉断裂（F_2）从研究区南部穿过，方向呈 NE 向；近 EW 向西大山断裂（$F_{5\text{-}7}$）从研究区中部的石英正长斑岩



①—康保–围场断裂带；②—丰宁–隆化断裂带；③—大庙–娘娘庙断裂带；④—尚义–平泉断裂带；⑤—上黄旗–乌龙沟断裂带；⑥—张北–沽源大断裂；⑦—马市口–松枝口大断裂；⑧—平坊–桑园大断裂；⑨—密云–喜峰口大断裂

①—Kangbao-Weichang fault zone; ②—Fengning-Longhua fault zone; ③—Damiao-Niangniangmiao fault zone; ④—Shangyi-Pingquan fault zone; ⑤—Shanghuangqi-Wulonggou fault zone; ⑥—Zhangbei-Guyuan fault; ⑦—Mashikou-Songzhikou fault; ⑧—Pingfang-Sangyuan fault; ⑨—Miyun-Xifengkou fault

图 1　崖门子地区大地构造位置 (a, 据参考文献[17] 修改**) 及区域地质图 (b)**

Fig. 1　Geotectonic location(a, modified according to reference [17]**) and regional geological map(b) of Yamenzi area**

($\lambda\xi\pi$)岩体中穿过, 断层规模较大, 岩石破碎, 破碎带宽约 5 m, 推测为逆断层; 研究区西侧的一系列 NW 向断层构成了一个长约 1 000 m, 宽约 50～200 m 的断裂破碎带, 带宽一般 2~8 m, 带内高岭土化、黄铁矿化发育, 为成矿物质的运移提供了良好的通道。

区内岩浆活动强烈, 表现为中生代侵入岩。其中早侏罗世细粒正长花岗岩($x\xi\gamma J_1$)主要分布在研究区北部, 面积较小。中侏罗世细粒斑状石英二长岩($x\pi\eta oJ_2$)面积较大, 在整个研究区均有出露。研究区中部西大山附近分布一石英正长斑岩体($\lambda\xi\pi$), 时代较晚, 侵位于髫髻山组 (J_2t) 地层和侏罗纪侵入岩中, 在其周边存在多处走向呈 NW 向的石英正长斑岩脉。石英正长斑岩与矿化关系较密切, 岩脉边部及其外接触带上发育铁锰矿化、黄铁(褐铁)矿化、硅化、高岭土化等, 局部绿泥石化、碳酸盐化发育。区内闪长岩、闪长玢岩等其他脉岩也比较发育, 大多受 NW 向构造控制。

2　样品采集和测试方法

根据研究区以往地质地球化学特征, 本次采用土壤地球化学工作方法, 在 1∶5 万 AS12 甲$_1$ 综合异常范围内布设土壤剖面 28 条, 实际长度 15.9 km, 共采集土壤样品 839 件(含 37 件重复样), 剖面方向垂直于矿化蚀变带方向。土壤剖面测量严格执行《土壤地球化学测量规范》(DZ/T 0145—2017), 采集的样品主要为能反映原生地质环境和找矿信息的残坡积物, 同时避开运积物、黏土质、有机质等的干扰, 采样粒级为−10～+60 目。样品分析由具有甲级资质的河北省地矿局第二地质大队实验室承担, 共分析 Cd、Sn、Mo、Bi、Cu、Pb、Zn、Au、Ag、As、Hg、Sb 12 种元素。样品测试及分析方法严格执行中华人民共和国地质矿产行业标准。除 Zn 采用电感耦合等离子体发射光谱法、As 和 Hg 采用原子荧光光谱法测试外, 其余元素均采用电感耦合等离子体质谱法测试。

3　土壤地球化学异常特征

3.1　土壤元素地球化学参数统计

运用 Excel 软件对研究区内分析的 12 种元素的测试结果进行数理统计。首先, 计算 12 种元素原始数据的算术平均值、富集系数(K_1)、标准偏差 (S_1)、变异系数 (C_{V1}); 其次, 对原始数据采用逐步迭代剔除的方式, 剔除平均值加(减)3 倍标准离差(即 X±3S)以外的数据, 使各元素的含量数据服从正态分布; 最后, 计算经过多次迭代后的元素富集系数(K_2)、标准偏差 (S_2) 和变异系数 (C_{V2})。结果见表 1[18-20]。

将元素的 C_{V1} 与 K_1 值按给定的数值标准进行分类, 结果见表 2。综合表 1、表 2 可以看出, 区内呈现极强富集的元素有 Cd、Ag、Pb、Bi、As、Hg、Sb、Zn、Mo、Au, 呈现强富集的元素有 Sn, Cu 呈现背景型。

此外, 元素原始数据的变异系数 C_{V1} 和背景数据 (剔除特高值之后的数据) 的变异系数 C_{V2} 能够指示元素的离散程度: C_{V1} 反映了地球化学场的相对变化幅度, C_{V1}/C_{V2} 反映了背景处理时的剔除程度[21-22]。如图 2 所示, 研究区内 Au 离散程度最大, C_{V1} 为 5.65, C_{V1}/C_{V2} 为 9.02, 其次是 As、Ag、Sn, C_{V1}>2.5, 均显示为极大离散型, 极容易富集成矿; 1.2<C_{V1}<2.5 的元素有 Bi、Cd、Pb、Mo、Zn, 说明其分布极不均匀, 离散数据多, 富集成矿的可能性很大; 变异系数在 0.8<C_{V1}<1.2 之间的元素为 Sb, 说明其分布均匀, 背景数据多, 有局部富集成矿的可能性, 在地球化学图

表 1　研究区土壤地球化学特征参数

Table 1　The characteristic parameters of soil geochemistry in the studying area

元素	原始数据					多次迭代后		
	算术平均值	最大值	标准离差(S_1)	富集系数(K_1)	变异系数(C_{V1})	算术平均值	标准离差(S_2)	变异系数(C_{V2})
Au	2.40	269.40	13.60	2.84	5.65	0.91	0.57	0.63
Ag	0.82	31.29	2.52	13.73	3.06	0.34	0.24	0.71
Zn	333.70	6386.00	520.30	4.91	1.56	170.93	109.39	0.64
Mo	2.67	100.90	4.63	4.31	1.73	1.94	0.96	0.49
Cd	1.49	32.11	3.20	18.64	2.14	0.51	0.41	0.80
As	26.60	1927.30	92.70	6.06	3.48	13.15	5.89	0.45
Hg	64.00	384.00	41.00	5.33	0.63	60.61	33.76	0.56
Cu	17.90	63.50	6.90	1.06	0.38	17.27	5.49	0.32
Sb	1.69	20.52	1.48	4.96	0.88	1.37	0.51	0.37
Pb	130.70	3194.80	249.10	6.88	1.91	69.40	49.91	0.72
Bi	1.14	62.57	2.67	6.32	2.35	0.63	0.30	0.48
Sn	3.80	276.50	11.60	1.82	3.03	3.00	1.04	0.35

注: 中国中东部大陆地壳平均值引自参考文献[19]; Au、Hg含量单位为10^{-9}, 其他元素含量单位为10^{-6}。

表 2　土壤元素变异系数与富集系数分级统计

Table 2　Classification statistics of variation coefficients and concentration coefficients for elements of soil geochemical survey

富集系数		元素	变异系数		元素
数值范围	富集程度		数值范围	分异程度	
>2.0	极强富集	Au、Mo、Zn、Sb、Hg、As、Bi、Pb、Ag、Cd	>2.5	极强分异	Sn、Ag、As、Au
1.5～2.0	强富集	Sn	1.2～2.5	强分异	Bi、Cd、Pb、Mo、Zn
1.2～1.5	富集		0.8～1.2	分异	Sb
0.8～1.2	正常	Cu	<0.8	弱分异	Hg、Cu

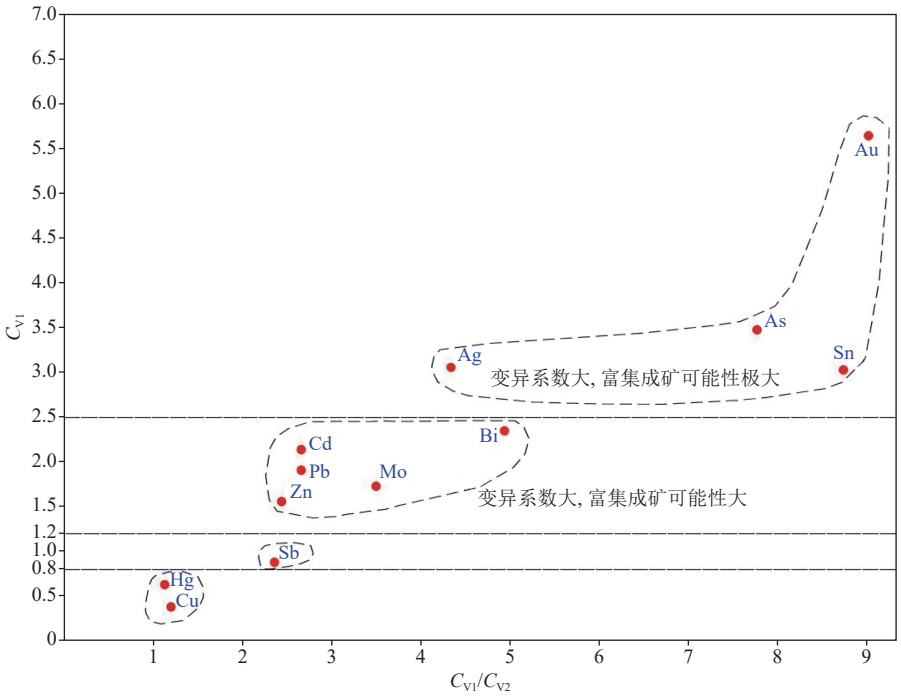


图 2　元素离散程度

Fig. 2　Scatter diagram of variation coefficients of elements

上呈背景分布; Hg、Cu 剔除前变异系数 C_{V1}<0.8, 说明其变化程度小, 其含量小于背景值, 富集成矿可能性小, 但不排除局部成矿的可能性[23]。

3.2　元素共生组合特征

3.2.1　R 型聚类分析

R 型聚类分析是对变量进行分类处理, 揭示元素在成晕成矿过程中的聚合趋势、成因联系, 便于进一步分析元素及元素组合之间的亲疏关系[24]。使用 SPSS 软件对 12 种元素的含量数据进行标准化处理, 采用系统聚类法对标准化处理后的数据进行 R 型聚类分析, 得到研究区土壤的 R 型聚类分析谱系(图 3)。当把距离系数 20 当作分类标准时, 元素可分为 4 类组合, 结合矿床地质特征及其矿石矿物产出特点可知: 第一组为 Zn、Cd、Au、Cu 组合; 第二组为 Sb、Pb、As、Ag、Mo、Hg 组合; 第三组为 Bi 单元素; 第四组为 Sn 单元素。

第一组和第二组元素组合均属于典型的中低温多金属成矿元素组合, 结合矿化特征推测, 这是研究区主要成矿活动的指示元素组合[25], 说明研究区成矿活动至少具有两期: 一期形成金、锌矿化体, 一期形成银铅矿化体[26]。Bi 和 Sn 为高温元素, 矿区岩石

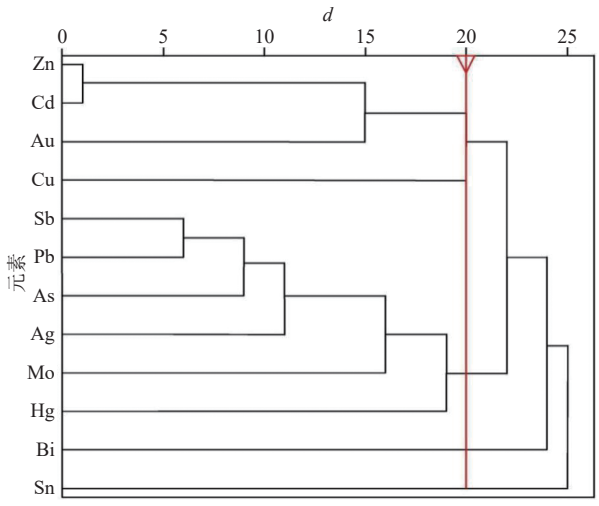


图 3　元素 R 型聚类分析谱系

Fig. 3　R-type clustering diagram of soil elements

中未发现该元素的独立矿物, 可能反映了成矿作用中的酸性岩浆活动。

3.2.2　因子分析

要查证数据是否符合因子分析的条件,首先要对其进行 KMO 和 Bartlett 检验。根据 Kaiser 给出的 KMO 度量标准进行判断, 本次研究数据的 KMO 度量值为 0.733(>0.5), Bartlett 球形检验 Sig 值为 0 (<0.05), 适合进行因子分析。利用 SPSS 软件对区内土壤地球化学样品的分析结果进行基于主成分变量的 R 型因子分析, 结果见表 3。

表 3　旋转成份矩阵及因子方差累计贡献

Table 3　Contribution to the total of orthogonal rotation factor matrix and factor variance

元素	成分			
	1	2	3	4
Au	0.208 3	−0.437	0.240 4	0.001 7
Ag	0.828 9	−0.133 4	−0.103 5	−0.013 7
Zn	0.098	−0.897 7	−0.054 8	−0.003 2
Mo	0.565 4	0.156 2	0.377 7	−0.015 1
Cd	0.246 6	−0.905 2	−0.081 5	−0.007 2
As	0.778	−0.273 2	0.002 5	−0.013 2
Hg	0.176 8	−0.484 4	0.336 3	−0.041 5
Cu	−0.039 5	−0.508 2	0.501 2	0.031
Sb	0.799 1	−0.288 5	0.286 5	0.055 5
Pb	0.708 3	−0.490 5	0.076 8	0.003 1
Bi	0.029 9	−0.023 3	0.754 9	−0.008 1
Sn	0.016 1	0.017 4	−0.006 5	0.998 4
旋转后累积方差贡献/%	35.525 1	48.387 3	54.457 6	65.807 3

以累积方差贡献率 65.807 3% 为基准,提取 4 个因子分别代表研究区 9 种元素, 组合类型为: F1 组合 Ag-Sb-Pb-Mo, 方差贡献率为 35.525 1%, 是研究区最为重要的矿化指示元素组合; F2 组合 Cd-Zn, 方差贡献率为 12.862 2%; F3 组合 Bi-Cu, 方差贡献率为 6.070 3%; F4 为 Sn, 方差贡献率为 11.349 7%。

3.3　元素及元素组合异常圈定

采用衬度异常法求取各元素的异常下限[27]。首先利用迭代剔除法剔除特高值(X+3S)和特低值(X−3S)后求取算术平均值; 其次将各元素的原始数据与迭代剔除后求出的算数平均值相比, 作为单元素的衬度值; 然后统计迭代剔除后数据的标准偏差和算术平均值, 此时的算术平均值基本上都为 1, 根据公式 $T=C_0$(衬度背景值)+2S(标准偏差) 求取单元素衬度异常下限 (表 4)。

将 F1(Ag-Sb-Pb-Mo)和 F2(Cd-Zn) 两组内的元素对应采样点的单点衬度值进行累加, 组成多元素衬度数据集, 再次利用迭代法求出异常下限 (表 4), 采用各个元素的衬度异常下限进行元素异常的圈定。采用 GeoChem Studio 软件绘制各个元素的衬度异常 (图 4)。

表 4　土壤地球化学衬度值参数统计

Table 4　Statistical characteristics of soil geochemical contrast values

元素	算数平均值	标准离差	衬度背景值	衬度标准离差	衬度异常下限
Au	0.91	0.57	1.00	0.62	2.25
Ag	0.34	0.24	1.00	0.72	2.44
Zn	170.93	109.39	1.00	0.64	2.28
Mo	1.94	0.96	1.01	0.56	2.13
Cd	0.51	0.41	1.01	0.81	2.63
As	13.15	5.89	1.03	0.50	2.03
Hg	60.61	33.76	1.00	0.56	2.11
Cu	17.27	5.49	1.00	0.32	1.64
Sb	1.37	0.51	1.01	0.45	1.91
Pb	69.40	49.91	1.01	0.77	2.54
Bi	0.63	0.30	1.00	0.49	1.98
Sn	3.00	1.04	1.00	0.35	1.70
F1(Ag-Sb-Pb-Mo)			4.28	2.18	8.64
F2(Cd-Zn)			2.00	1.41	4.82

注: Au、Hg含量单位为10^{-9}, 其他元素含量单位为10^{-6}。

3.4　异常分布特征及靶区圈定

从各元素衬度异常分布图(图 4)可以看出, 元素异常的总体形态呈环形, 且呈串珠状围绕着火山机构与石英正长斑岩体接触部位产出, 表明元素土壤地球化学异常与石英正长斑岩体和火山活动关系密切。Au、Ag、Pb、Zn 异常强度高, 浓度分带清晰, 均具三级浓度分带, 其中 Au、Ag 在全区发育最好, 呈串珠状分布, 且受构造控制明显, 长轴方向大致与断层或岩脉方向平行, Au 异常最大值为 269.4×10^{-9}, 是背景值的 325 倍, Ag 异常最大值为 31.29×10^{-6}, 是背景值的 447 倍, Cu、Hg 异常相对较弱, Hg 具二级浓度分带, Cu 具一级浓度分带。因此以银、铅、锌、金等为主的多金属矿具有较大的找矿潜力。

通过综合分析区内成矿地质背景, 得出土壤地球化学元素异常与火山岩地层和石英正长斑岩有着紧密联系, 尤其是在石英正长斑岩体与火山岩地层的接触部位化探异常极为发育, 是成矿的有利地段。根据各元素衬度异常套合情况、组合异常的分布情况, 结合区域地质成矿背景, 圈定出Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ共 5 个找矿靶区(图 4)。

Ⅰ号靶区位于研究区西部, 由 F2(Cd-Zn)、F1(Ag-Sb-Pb-Mo)和 Au 组成, 各元素异常套合较好, 具有明显浓集中心。异常出露在石英正长斑岩体($\lambda\xi\pi$)与九龙山组 (J_2j) 地层的接触部位, 展布方向与石英正长斑岩体基本一致, 且铁锰矿化发育。该异常 Au、Cd、Zn、Bi、Ag、Pb 具三级浓度分带, 异常峰值分别为 269.40×10^{-9}、22.59×10^{-6}、6 386×10^{-6}、11.91×10^{-6}、

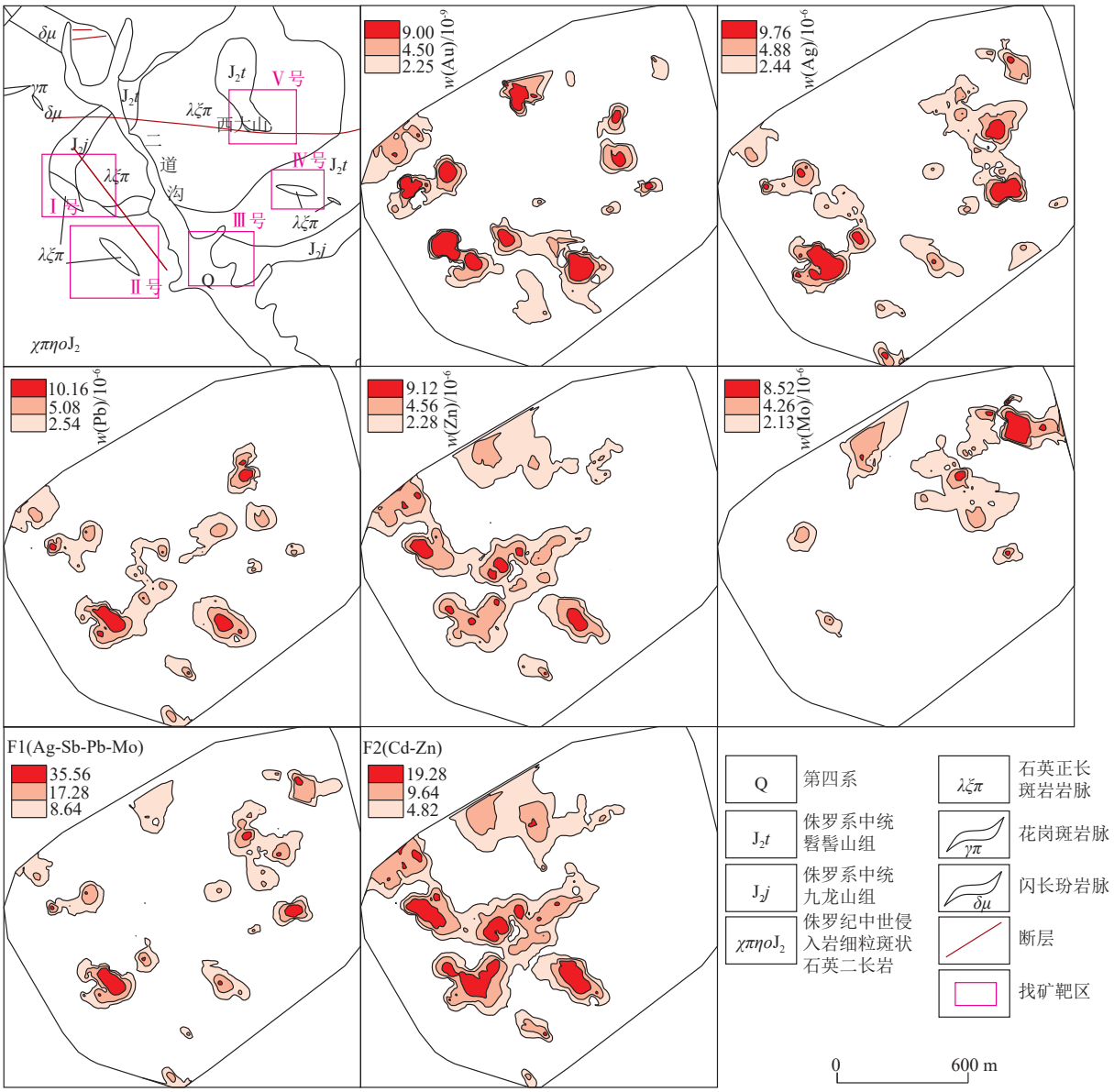


图 4　元素衬度异常分布及找矿靶区预测

Fig. 4　Distribution of contrast anomalies and prediction of soil geochemical target areas

6.80×10^{-6}、$1\,731.1\times10^{-6}$，具有以 Ag 为主的多金属矿的成矿潜力。

Ⅱ 号靶区位于研究区西南部，由 F2(Cd-Zn)、F1(Ag-Sb-Pb-Mo)、Au 和 As 组成，异常长轴方向呈北西向，出露在细粒斑状石英二长岩($\chi\pi\eta oJ_2$)、侏罗系中统九龙山组(J_2j)以及石英正长斑岩($\lambda\xi\pi$)的接触带上，且发育多条 NW 向断裂。各元素异常套合好、规模大，其中 As、Au、Ag、Cd、Pb、Zn、Sb 具三级浓度分带，异常峰值分别为 $1\,927.3\times10^{-6}$、236.3×10^{-9}、26.5×10^{-6}、29.6×10^{-6}、$3\,194.8\times10^{-6}$、$3\,229\times10^{-6}$、20.5×10^{-6}。该靶区蚀变强烈，以铁锰矿化、黄铁(褐铁)矿化、硅化、高岭土化为主，推测该靶区内成矿潜力较大。

Ⅲ 号靶区位于研究区南部，综合异常由 F2(Cd-Zn)、Au、Pb 和 Ag 组成，异常长轴方向呈 NW 向，主要分布在九龙山组 (J_2j) 地层内，其中 Au、Cd、Zn、Pb 具三级浓度分带，异常峰值分别为 100.9×10^{-9}、32.11×10^{-6}、$4\,489\times10^{-6}$、$1\,919.2\times10^{-6}$。该靶区矿化发育、蚀变强烈，具有形成多金属矿的潜力。

Ⅳ 号靶区位于研究区东部，由 F1(Ag-Sb-Pb-Mo)、Au 和 As 组成，长轴方向呈 NW 向，分布在石英正长斑岩与髫髻山组 (J_2t) 地层接触带上，与石英正长斑岩脉走向一致。该靶区矿化发育、蚀变强烈，预测有较大找矿潜力。

Ⅴ 号靶区位于研究区东北部，主要由 F1(Ag-Sb-Pb-Mo)和 Au 组成，分布在石英正长斑岩与髫髻山组 (J_2t) 地层接触带上，内部有近 EW 向断裂通过。其中 Ag、Au 具三级浓度分带，异常峰值分别为 31.29×10^{-6}、25.99×10^{-9}。该靶区矿化发育、蚀变强

烈, 具有一定的成矿潜力。

4　找矿潜力分析

4.1　工程验证情况

根据土壤综合异常、物探异常、构造带及矿化出露情况, 在Ⅰ～Ⅳ号找矿靶区内开展了槽探和钻探工程验证。其中, 在Ⅰ号靶区物化探异常峰值区沿走向施工 4 个探槽, 圈定了两条 Zn 矿化体(按边界品位的 1/2 圈定), 编号Ⅰ-1、Ⅰ-2, 地表由 3 个探槽控制, 走向 NW, 长 201.6 m, 宽度 1.42～9.16 m, 平均品位 0.37%。经施工深部验证孔 ZK2 在Ⅰ-1 号矿化体上圈定 Zn 工业矿体 1 条, Zn 低品位矿体 1 条, 其中 Zn 工业矿体平均厚度 1.49 m, Zn 平均品位 1.14%, 低品位 Zn 矿体平均厚度 2.23 m, Zn 平均品位 0.78%。在Ⅰ-2 号矿化体上圈定低品位 Zn 矿体 1 条, 倾角 57°, 平均品位 0.56%, 平均厚度 2.66 m。矿化体均伴生不同程度的 Ag 矿化, 且受构造控制明显(图 5)。

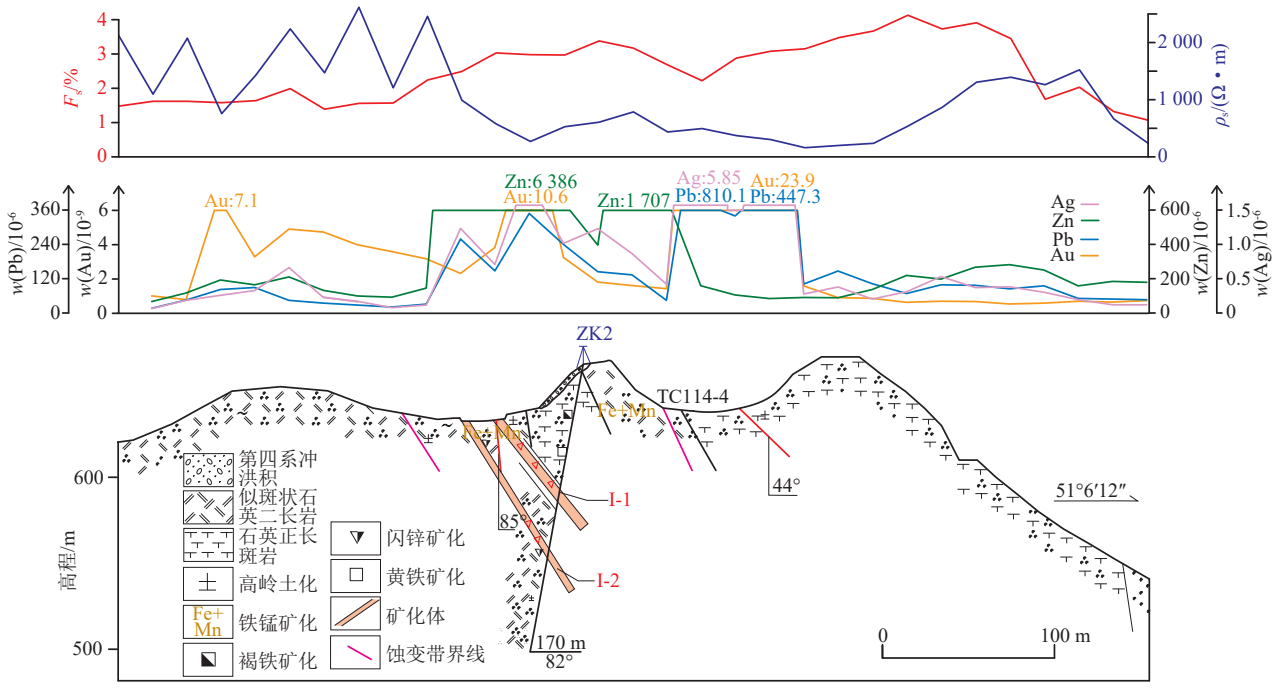


图 5　114 线地质、物探、化探综合剖面

Fig. 5　Geological, geophysical and geochemical comprehensive section of line 114

Ⅱ号靶区内施工了 2 条探槽, 根据取样测试结果, 探槽内揭露 1 条低品位 Zn 矿(化)体, 矿体赋存于构造破碎带内, 长约 70 m, 宽 3.75 m, Zn 含量一般在 0.15%～0.93%。

Ⅲ号靶区内施工探槽 2 条, 在两个约 1 m 宽的构造破碎带内发现 Pb 低品位矿化体 2 条, 品位分别为 0.48%、0.54%, 真厚度 0.58 m、0.45 m。

Ⅳ号靶区在异常峰值区沿走向施工 2 个探槽和 1 个深部验证孔 ZK1, 圈定了两条以 Ag 为主的矿化体(按边界品位的 1/2 圈定), 编号Ⅳ-1、Ⅳ-2, 走向近 EW 向, 长 167 m, 宽 2.23～5.55 m, 平均品位 35.61%, 矿化体内含 Ag 多金属矿体 2 条, 其中 1 条矿体由探槽揭露, 走向延伸约 60 m, 包含 1 条银工业矿体和 1 条低品位银矿体, 银工业矿体厚度 0.85 m, 品位 94.5 g/t, 低品位银矿体厚度 1.70 m, 品位 59.76 g/t。另一条矿体由探槽和钻孔揭露, 探槽内矿体厚度 1.07 m, Ag 品位 110 g/t, 钻孔内矿体平均厚度 1.89 m, Pb 平均品位 1.04%, Zn 平均品位 1.37%。

4.2　成矿潜力分析

1)崖门子地区位于华北板块北缘中段燕辽有色和贵金属成矿带内, 该带构造活动强烈, 火山活动十分频繁, 广泛出露的陆相火山岩—潜火山岩为 Ag 的迁移、富集和成矿提供了丰富的物质来源, 形成了多处与陆相火山—次火山热液活动有关的银铅锌矿。研究区内分布崖门子银铅锌多金属矿化(点), 也与火山活动有关, 说明研究区具有陆相火山—次火山热液型银多金属矿的找矿潜力。

2)对比 1∶50 000 水系沉积物异常, 研究区 1∶10 000 土壤测量异常重现性较好, 尤其是 Ag 异常更加显现, 浓集中心明显, 峰值高, 是寻找银多金属矿的重要找矿标志。通过土壤测量在研究区内圈定了 5 处找矿靶区, 目前仅在地球化学异常局部地

段布置了少量工程揭露，受工作手段和工作量的限制，还需要开展进一步的查证工作。尤其是Ⅰ号找矿靶区和Ⅳ号找矿靶区，由于工作程度较低，探槽、钻孔对矿 (化) 体的控制程度不够，已有的钻探工程最深仅 230 m，如果开展进一步的钻探工程验证，有发现新的、较大规模的矿体的潜力。

3）通过与西支家地浅成低温热液型银铅锌矿床对比，发现崖门子地区的成矿模式与支家地银矿具有相似的特征（表 5）。支家地铅锌银矿存在两种矿体类型，即断裂热液充填型矿体和隐爆角砾岩型矿体，无论哪种类型，矿体均与石英斑岩体密切相关[28-31]，均产在石英斑岩体附近，上部的石英斑岩小岩枝在深部对应着规模较大的石英斑岩岩株[32-33]。前期工作中该矿床在地表施工的多个钻孔内仅见到小的矿脉，后经综合研究在次火山岩体接触带上发现了厚大矿体 (图 6)。崖门子目前在浅部见到了碎裂相

表 5　崖门子银铅锌矿与支家地银铅锌矿[34] 成矿条件对比

Table 5　Comparison of ore-forming conditions between Yamenzi silver-Pb-Zn mine and Zhijiadi silver-Pb-Zn mine[34]

要素	支家地	崖门子
大地构造背景	华北地台北缘，燕山断块的涞源块隆与五台块隆的过渡地带，中生代火山岩断陷盆地—太白维山破火山口内	中朝准地台($Ⅰ_2$)燕山台褶带($Ⅱ_2^2$)马兰峪复式背斜($Ⅲ_2^7$)下板城凹断束($Ⅳ_2^{23}$)与承德拱断束($Ⅲ_2^6$)之大庙穹断束($Ⅳ_2^{20}$)接壤部位
地层	蓟县系高于庄组四段，中生界侏罗系白旗组	蓟县系雾迷山组四段、中生界侏罗系中统九龙山组、髫髻山组
控矿构造	断裂构造、侵入接触构造、线状的火山角砾岩通道相构造	断裂构造、侵入接触构造
岩浆岩	新太古代五台期变质石英闪长岩、燕山期次火山岩以及隐爆角砾岩，潜火山岩主要为石英斑岩	新太古代晚期酸性变质深成岩、早侏罗世酸偏碱性侵入岩、中侏罗世中性侵入岩，脉岩主要有石英正长斑岩脉、花岗斑岩脉、石英脉等
矿物组合	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、石英、斜长石、钾长石、方解石、铁菱锰矿和含铁菱锰矿、绿泥石、叶蜡石、黏土矿物、绢云母	黄铁矿、方铅矿、闪锌矿居、黄铜矿、钛铁矿、褐铁矿、黏土矿物、石英、绿泥石
围岩蚀变	绢云母化、硅化、黄铁矿化、碳酸盐化、锰矿化等	铁锰矿化、黄铁(褐铁)矿化、硅化、高岭土化等，局部绿泥石化、碳酸盐化
矿床成因	与陆相潜火山岩有关的浅成低温热液矿床	陆相火山—次火山热液型
地球化学特征	As、Sb、Cu、Pb、Zn、Cd、Au、Mo的高值异常区	元素土壤地球化学异常与石英正长斑岩体和火山活动关系密切。Au、Ag、Pb、Zn异常强度高，浓度分带清晰，均具三级浓度分带
找矿标志	锰帽；石英斑岩；隐爆角砾岩筒；地球化学异常；火山口接触带；围岩蚀变	锰帽；石英正长斑岩；地球化学异常；火山口接触带；围岩蚀变

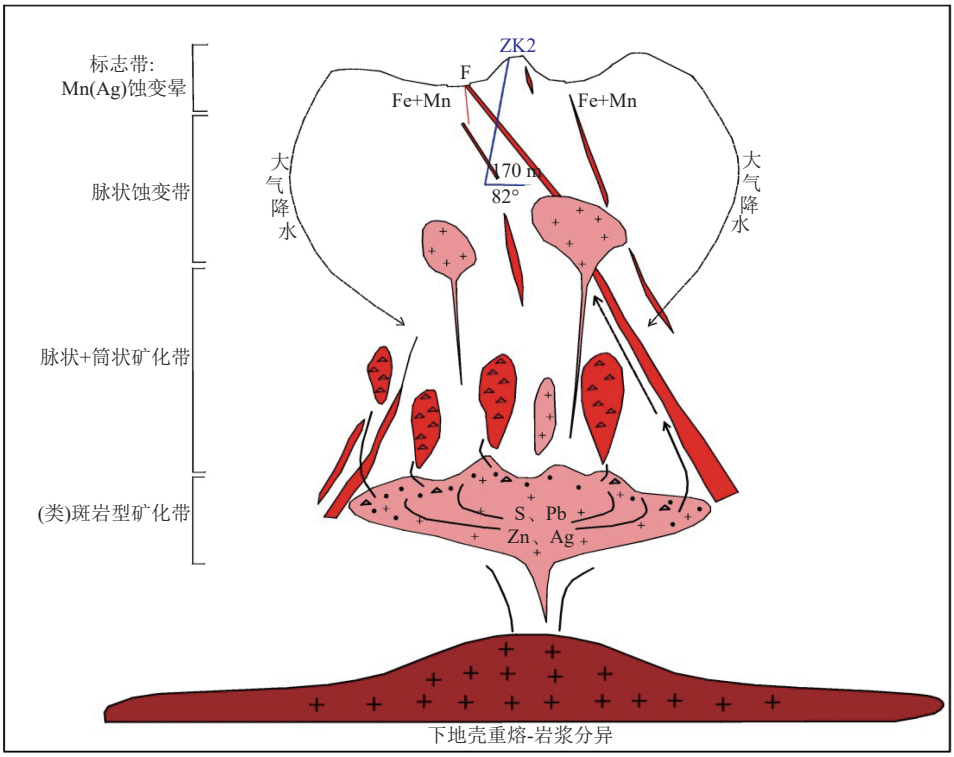


图 6　崖门子银铅锌矿找矿预测模型（据参考文献[33] 修改）

Fig. 6　Metallogenic prediction model of Ag-Pb-Zn deposits in Yamenzi area (modified according to reference [33]**)**

Ag、Pb、Zn 矿体, 在其深部极有可能存在震裂相甚至爆破相矿体, 具有寻找隐爆角砾岩型矿体的潜力。因此下一步工作的重点应集中在探测石英斑岩体上, 进而追索到更大规模矿体。

综上可以看出, 研究区具有寻找火山—次火山岩型银多金属矿的找矿潜力, 主攻矿种为银铅锌矿, 兼顾金矿。

5　结论

1)通过土壤地球化学数据数理统计和对比分析, 发现研究区内 Au、Ag、Pb、Zn 含量较高, 且变异系数大, 形成的异常面积较大, 认为 Au、Ag、Pb、Zn 具有较大的成矿潜力。成矿元素异常的总体形态呈环形, 多围绕着火山机构与石英正长斑岩体接触部位产出, 且受构造控制明显, 与火山—次火山活动关系密切。

2)根据各元素衬度异常套合情况以及组合异常的分布, 在研究区共圈出Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ5 个找矿靶区。通过在Ⅰ-Ⅳ号找矿靶区内布设槽探和钻探工程验证, 均揭露到工业矿体或低品位矿体, 说明圈定的土壤综合异常均为矿致异常。因工作量有限, 未控制到主要的矿体, 需开展进一步的研究以扩大矿体规模。

3)通过对比山西支家地银铅锌矿的成矿模式, 发现研究区成矿模式与支家地银矿具有相似的特征。崖门子矿体与地表石英正长斑岩体关系密切。石英斑岩脉在地表广泛分布, 在岩脉深部可能对应着规模较大的石英斑岩岩株。因此加强对石英斑岩体的研究可以追索到更大规模的矿体。

参考文献(References):

[1] 毛佳, 李鹏远, 周平. 中国主要贵金属资源利用及关键性评估 [J]. 工业技术经济, 2017, 36(11): 37−43.
Mao J, Li P Y, Zhou P. Major precious metal resources utilization and criticality assessment in China[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2017, 36(11): 37−43.

[2] 鞠建华, 张照志, 潘昭帅, 等. 我国战略性新兴产业矿产厘定与“十四五”需求分析 [J]. 中国矿业, 2022, 31(9): 1−11.
Ju J H, Zhang Z Z, Pan Z S, et al. Determination of mineral resources in China’s strategic emerging industries and analysis of the demand of the“14th five year plan”[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(9): 1−11.

[3] 潘昭帅, 张照志, 车东, 等. 中国银矿资源特征及新能源背景下需求分析 [J]. 中国地质, 2024, 51(5): 1554−1569.
Pan Z S, Zhang Z Z, Che D, et al. Characteristics and demand analysis of silver resources in China under the background of new energy[J]. Geology in China, 2024, 51(5): 1554−1569.

[4] 江彪, 张通, 王登红, 等. 中国银矿床地质控矿规律及若干找矿方向 [J]. 地质学报, 2020, 94(1): 113−126.
Jiang B, Zhang T, Wang D H, et al. Factors controlling ore formation regularity and some prospecting strategies for silver deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(1): 113−126.

[5] 刘启凡, 赵建亮, 李献龙, 等. 燕辽成矿带斑岩型钼矿床致矿岩体地球化学特征 [J]. 资源环境与工程, 2025, 39(3): 248−257.
Liu Q F, Zhao J L, Li X L, et al. Geochemical characteristic of ore-forming intrusions of porphyry molybdenum deposits in YanShan-Liaoning metallogenic belt[J]. Resources Environment& Engineering, 2025, 39(3): 248−257.

[6] 梁瑞, 徐超, 张晓梅. 河北蔡家营铅、锌、银多金属矿区外围找矿探讨 [J]. 矿产与地质, 2013, 27(1): 36−44.
Liang R, Xu C, Zhang X M. Peripheral prospecting in Caijiaying Pb-Zn-Ag polymetallic mining area of Hebei[J]. Mineral Resource and Geology, 2013, 27(1): 36−44.

[7] 梁瑞, 白海军, 赵军, 等. 浅谈脉岩在热液矿床成矿中的作用−以河北蔡家营铅锌银矿床为例 [J]. 矿产勘查, 2012, 3(6): 767−773.
Liang R, Bai H J, Zhao J, et al. Discussion on quartz porphyry dike in the metallogenetic process of hydrothermal lead-zinc-silver mineralization-A case study on Caijiaying Pb-Zn-Ag deposit, Hebei [J]. Mineral Exploration, 2012, 3(6): 767−773.

[8] 魏晓英. 河北丰宁营房—牛圈银矿床构造控矿特征和成因探讨 [J]. 地质找矿论丛, 2000, 15(3): 262−266.
Wei X Y. Discussion on structural control characteristics and genesis of Yingfang-Niujuan silver deposit, Hebei[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2000, 15(3): 262−266.

[9] 梁瑞. 论冀西北青羊沟—兰闫一带铅锌多金属矿地质特征及找矿方向 [J]. 华北国土资源, 2014, 61(4): 83−86.
Liang R. Discussion on the geological characteristics and prospecting directions of Lead-Zinc Polymetallic Deposits in the Qingyanggou-Lanyan Area, northwestern Hebei[J]. North China Land and Resources, 2014, 61(4): 83−86.

[10] 刘成维, 谷振飞, 魏明辉, 等. 河北相广锰银矿床成矿特征与形成机理 [J]. 矿产勘查, 2012, 3(2): 165−170.
Liu C W, Gu Z F, Wei M H, et al. Metallogenic characteristics and formation mechanism of the Xiangguang Mn-Ag ore deposit, Hebei[J]. Mineral Exploration, 2012, 3(2): 165−170.

[11] 万会, 常执政, 万贵龙, 等. 河北承德地区烟筒山—磴西锌多金属矿床地质特征及找矿方向 [J]. 地质与勘探, 2021, 57(5): 959−968.
Wan H, Chang Z Z, Wan G L, et al. Geological characteristics and prospecting direction of the Yantongshan-Dengxi zinc polymetallic mine district in the Chengde area, Hebei Province[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(5): 959−968.

[12] 李久明. 燕山地区银矿及成矿作用地球动力学背景 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
Li J M. Silver deposits and their metallogenic geodynamics setting in Yanshan area[D]. Shenyang: Northeastern University , 2006.

[13] 翁望飞, 王德恩, 王敏. 安徽省休宁−歙县地区水系沉积物地球化学特征及找矿远景 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(5): 932−942.
Weng W F, Wang D E, Wang M. Geochemical characteristics of

stream sediments and prospectivity of the Xiuning-Shexian area, Anhui Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2018, 37(5): 932−942.

[14] 河北省地质矿产勘查开发局. 河北重要有色金属矿床 [M]. 北京: 地质出版社, 2021.
Hebei Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development. Important nonferrous metal deposits in Hebei province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.

[15] 杨志达, 杨兆才, 潘建业, 等. 河北寿王坟—小寺沟火山—侵入杂岩体找矿的新认识 [J]. 地质找矿论丛, 1988, 3(3): 20−33.
Yang Z D, Yang Z C, Pan J Y, et al. New perspectives on mineral exploration in the Shouwangfen-Xiaosigou volcanic-plutonic complex, Hebei[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 1988, 3(3): 20−33.

[16] 王晨光, 任建红, 王丰翔, 等. 冀东平泉小寺沟斑岩铜(钼)矿矿床地质特征与研究现状 [J]. 河北地质大学学报, 2024, 47(6): 19−26.
Wang C G, Ren J H, Wang F X, et al. Geological characteristics and current research status of Xiaosigou porphyry copper (molybdenum) deposit in Pingquan, eastern Hebei Province[J]. Journal of Hebei Geo University, 2024, 47(6): 19−26.

[17] 李孝红, 李生路, 王艳辉. 小寺沟铜钼矿区及外围地质地球化学异常特征及找矿方向 [J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 305-308.
Li X H, Li S L, Wang Y H. Geochemical anomaly characteristics and ore-prospecting targets in the Xiaosigou molybdenun ore district and its periphery areas[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(4): 305-308.

[18] 赵欣怡, 罗先熔, 杨笑笑, 等. 河南洛宁石龙山金多金属矿预查区土壤地球化学特征及找矿远景分析 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(4): 768−778.
Zhao X Y, Luo X R, Yang X X, et al. Soil geochemical characteristics and prospecting potential analysis of the Shilongshan Au-polymetallic prospectingarea, Luoning County, Henan Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(4): 768−778.

[19] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学元素丰度数据手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
Chi Q H, Yan M C. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2007.

[20] 邢博钊. 河北省郭杖子地区金多金属矿床地质−地球化学特征及成矿预测 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Xing B Z. Geological and geochemical characteristics and metallogenic prediction of gold polymetallic in Guozhangzi area, Hebei Province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.

[21] 袁和, 罗先熔, 李武毅, 等. 西藏邦卓玛地区土壤地球化学特征及找矿预测 [J]. 地质与勘探, 2017, 53(3): 472-481.
Yuan H, Luo X R, Li W Y, et al. Geochemical characteristics of soil and prospecting prediction of the Bangzhuoma region, Tibet[J]. Geology and Exploration, 2017, 53(3): 472-481.

[22] 黄文斌, 罗先熔, 贾飞, 等. 陕西汉南碑坝地区土壤地球化学特征及找矿预测 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(6): 1110−1117.
Huang W B, Luo X R, Jia F, et al. Soil geochemical characteristics of soils in the Beiba area, southern Hanzhong City, Shaanxi Province and their application for mineral prospecting prediction[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(6): 1110−1117.

[23] 胡二红, 张善明, 贺中银, 等. 内蒙古额济纳旗微波山地区土壤地球化学特征及找矿潜力 [J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1303−1317.
Hu E H, Zhang S M, He Z Y, et al. Soil geochemical characteristics and metallogenic potential in Weibo mountain area of Ejina Banner, Inner Mongolia[J]. GeoScience, 2020, 34(6): 1303−1317.

[24] 于俊博, 宋云涛, 郭志娟, 等. R 型聚类分析在区域化探元素分组中的作用探讨 [J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(6): 771−776.
Yu J B, Song Y T, Guo Z J, et al. Discussion on the affection of the R-cluster analysis applied in grouping elements in regional geochemical exploration[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(6): 771−776.

[25] 刘珊, 陈亮, 段先哲, 等. 土壤地球化学测量在黔东八瓢达冲金矿勘查中的应用与找矿效果 [J]. 物探与化探, 2016, 40(1): 27−32.
Liu S, Chen L, Duan X Z, et al. The application of soil geochemistry survey to prospecting in the Bapiao Dachong gold ore district of eastern Guizhou Province and its effect[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 27−32.

[26] 王建设, 赵森, 杨治武. 基于多元统计分析的李家坳铅锌矿区土壤地球化学找矿研究 [J]. 物探化探计算技术, 2020, 42(4): 543−549.
Wang J S, Zhao S, Yang Z W. Based on multiple statistical analysis of soil geochemical prospecting research in Li-Jia-ao lead-zinc mining area[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 42(4): 543−549.

[27] 赵荣军. 不同方法在栾川北部化探数据处理中的应用 [J]. 地质与勘探, 2006, 42(3): 67−71.
Zhao R J. Application of different data processing method in geochemical exploration in the Luanchuan[J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(3): 67−71.

[28] 李树臣, 周利霞. 山西省灵丘县支家地铅锌银矿床地质特征及成矿预测 [J]. 地质与勘探, 2008, 44(3): 18−21.
Li S C, Zhou L X. Geology and ore prospecting of Zhijiadi silver deposit in the Lingqiu County, Shanxi[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(3): 18−21.

[29] 杨建功. 晋东北支家地银矿床成矿特征及成因分析 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1999, 8(6): 551−555.
Yang J G. Metallogenic features and genesis of the Zhijiadi silver in northeastern Shanxi[J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 1999, 8(6): 551−555.

[30] 张北廷, 李占新, 刘凤岐, 等. 山西灵丘支家地银矿地质特征 [J]. 华北地质矿产杂志, 1995, 10(2): 257−268.
Zhang B T, Li Z X, Liu F Q, et al. Geological characteristics of Zhijiadi silver deposit in Lingqiu, Shanxi[J]. North China Journal of Geology and Mineral Resources, 1995, 10(2): 257−268.

[31] 周绍芝. 晋东北地区银(金)矿成矿特征及远景浅析 [J]. 地质与勘探, 1999, 35(3): 6−23.
Zhou S Z. Geology and prospecting of silver(gold) deposits in northeast Shanxi[J]. Geology and Prospecting, 1999, 35(3): 6−23.

[32] 覃娴瑟. 山西省灵丘县支家地铅锌银矿地质地球化学特征及成因研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Qin X S. The geological-geochemical characteristics and metallogeny of Zhijiadi Pb-Zn-Ag deposit, Lingqiu, Shanxi[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[33] 张会琼. 山西支家地浅成低温热液型银铅锌矿床成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
Zhang H Q. Research on metallization of Zhijiadi epithermal-type Ag-Pb-Zn deposit in Shanxi, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2014.

[34] 李兆龙, 张连营, 樊秉鸿, 等. 山西支家地银矿地质特征及矿床成因 [J]. 矿床地质, 1992, 11(4): 315−324.
Li Z L, Zhang L Y, Fan B H, et al. Geological characteristics and genesis of the Zhijiadi silver deposit, Shanxi Province[J]. Mineral Deposits, 1992, 11(4): 315−324.

[35] 樊磊. 河北省丰宁县牛圈子银金矿床地质特征及控矿因素 [J]. 矿产与地质, 2021, 35(1): 50−57.
Fan L. Geological characteristics and ore-controlling factors of Niuquanzi silver-gold deposits in Fengning County, Hebei[J]. Mineral Resources and Geology, 2021, 35(1): 50−57.

Soil geochemical characteristics and mineralization potential of silver-polymetallic deposits in Yamenzi area, Hebei Province

CUI Li-Nan, PAN Wei, LIU Chun-Lai, CUI Wei, FENG Bei-Bei

(*No. 2 Geological Brigade of Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration* (*Hebei Provincial Technology Center for Mine Environmental Remediation and Governance*), *Tangshan* 063000, *China*)

Abstract: The Yamenzi area is located within the Yanshan-Liaoning metallogenic belt in the middle segment along the northern margin of the North China plate. This metallogenic belt serves as an important one for nonferrous and precious metals in China, characterized by favorable geological conditions for volcanic to subvolcanic silver-polymetallic ores. To further optimize targets and evaluate their potential for ore prospecting, this study conducted a 1∶10,000 soil geochemical survey in the Yamenzi area. By analyzing mathematical statistics and delineating anomaly contrasts of the 12 testing elements, silver (Ag), lead (Pb), zinc (Zn), and gold (Au) were identified as the primary metallogenic elements of the area. Based on the metallogenic geological setting and the coincidence of element anomalies, five prospecting targets were identified. Subsequently, these targets were verified by trenching and drilling engineering, revealing multiple Ag-Pb-Zn orebodies. A comprehensive comparison revealed similar patterns of Ag-Pb-Zn metallogenic belts between the Yamenzi in Hebei and Zhijiadi in Shanxi. Therefore, further investigating metallogenic regularity within the Yamenzi area could potentially guide the discovery of larger-scale orebodies.

Key words: soil geochemical characteristics; volcanic to subvolcanic; silver-polymetallic ore; prospecting potential; Yamenzi area

（本文编辑: 蒋实）