



引文格式: 向文帅, 吴颖, 赵凯, 等. 厄立特里亚 GASH 金矿集区地球化学特征及信息提取[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 184–196. DOI: 10.12401/j.nwg.2023169

Citation: XIANG Wenshuai, WU Ying, ZHAO Kai, et al. Geochemical Characteristics and Information Extraction in GASH Ore Concentration Area, Eritrea[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 184–196. DOI: 10.12401/j.nwg.2023169

## 厄立特里亚 GASH 金矿集区地球化学特征及信息提取

向文帅<sup>1</sup>, 吴颖<sup>2,\*</sup>, 赵凯<sup>1</sup>, 曾国平<sup>1</sup>, 姜军胜<sup>1</sup>, 张紫程<sup>3</sup>,  
白洋<sup>2</sup>, 张元培<sup>2</sup>, 罗军强<sup>2</sup>, 郑雄伟<sup>2</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心 / 中南地质科技创新中心, 湖北 武汉 430205; 2. 湖北省地质局地球物理勘探大队, 湖北 武汉 430056; 3. 中国地质矿业集团有限公司, 北京 100029)

**摘要:** GASH 金矿集区位于厄立特里亚西部的碧沙 Au 多金属成矿带, 具有良好的区域成矿背景。区内 1 : 10 万水系沉积物测量数据的地球化学特征表明, Au、Hg、As、W、Bi 等元素呈强分异的分布特征, Au、As、Sb、W 具有强富集的分布特征, 显示优异的 Au 找矿前景。通过元素相关性分析, 筛选出能够有效指导 Au 矿勘查的 F5 因子 (Au-Hg 元素组合)、指示区域断裂构造分布的 F2 因子 (Ag-Bi-Mo-W 元素组合) 及 F3 因子 (As-Sb-Pb 元素组合), 指示基性-超基性地体分布的 F1、F4 特征因子。对 F5 因子得分开展异常信息提取, 并结合矿产地质特征, 圈定出可开展进一步原生岩金矿勘查工作的异常区 8 处, 基于指示成矿热液活动的 F2、F3、F5 特征因子推断出 NE、N-NE 向的规模较大的断裂 12 条, 为研究区的找矿预测及勘查工作部署提供了有利的地球化学依据。

**关键词:** 非洲; 厄立特里亚; 金矿; 地球化学; 异常提取; 断裂构造

中图分类号: P632

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0184-13

### Geochemical Characteristics and Information Extraction in GASH Ore Concentration Area, Eritrea

XIANG Wenshuai<sup>1</sup>, WU Ying<sup>2,\*</sup>, ZHAO Kai<sup>1</sup>, ZENG Guoping<sup>1</sup>, JIANG Junsheng<sup>1</sup>, ZHANG Zicheng<sup>3</sup>, BAI Yang<sup>2</sup>,  
ZHANG Yuanpei<sup>2</sup>, LUO Junqiang<sup>2</sup>, ZHENG Xiongwei<sup>2</sup>

(1. Wuhan Center of China Geological Survey / Central South China Innovation Center for Geosciences, Wuhan 430205, Hubei, China;  
2. Geophysical Exploration Brigade Hubei Geological Bureau, Wuhan 430056, Hubei, China; 3. China National Geological & Mining Corporation, Beijing 100029, China)

**Abstract:** GASH Au ore concentration area belongs to Bisha gold metallogenic belt in West Eritrea, with a good regional metallogenic setting. The geochemistry of stream sediment mapping at scale of 1 : 100,000 indicate: Au, Hg, As, W, Bi are characteristic of strong-differentiated distribution, Au, As, Sb, W are characteristic of strong-rich distribution, showing a good prospecting for Au exploration. Through the correlation analysis, F5

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-08-10; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“厄立特里亚-埃塞俄比亚钾盐铜金资源调查”(DD20230575), “北部非洲大型铜金资源基地评价”(DD20190443), 湖北省自然科学基金项目“努比亚地盾前寒武纪斑岩 Cu-Au 矿床相关的埃达克质岩成因: 对泛非增生造山作用和区域成矿的指示”(2022CFB850)联合资助。

作者简介: 向文帅(1986-), 男, 正高级工程师, 长期从事境外地质矿产调查与研究工作。E-mail: oldwenzi@163.com。

\* 通讯作者: 吴颖(1982-), 男, 硕士, 长期从事境外地球化学勘查工作。E-mail: 493652968@qq.com。

factor (Au-Hg association) is confined to guide the Au exploration,  $F2$  factor (Ag-Bi-Mo-W association) and  $F3$  factor (As-Sb-Pb association) which are confined to guide the distribution of fault structures,  $F1$  and  $F4$  factor are confined to guide the distribution of basic and ultrabasic geological unit. with the anomaly information extract from  $F5$  factor combined with the geological characteristic, 8 anomaly area with good Au metallogenic prospecting were determined, base on the characteristic of  $F2$ ,  $F3$ ,  $F5$  factors, which are useful in indicating the metallogenic hydrothermal activity, 12 regional fault with NE, N-NE attitude were deduced. All the information extracted are useful geochemical evidence to the following gold exploration and the work deployment.

**Keywords:** Africa; Eritrea; gold; geochemical; anomaly extract; fault structure

厄立特里亚主体位于努比亚地盾南侧,受新元古代东非造山运动影响,广泛发育NE向及NW向断裂及韧性剪切带构造,同时形成了大量造山型及VMS型金矿(Johnson, 2011, 2017; 姚华舟等, 2019; 向文帅等, 2022; 李福林等, 2022),已知金矿床的构造控矿特征明显。近些年来,大量矿业企业持续在该国东部的阿斯马拉成矿带开展地质-地球化学勘查工作,取得了较好的Au-Cu-Zn-Ag矿勘查成果,并在成矿地质条件及规律上有了进一步的认识(Guiraud, 2005; Ghebreab, 2009; 向鹏等, 2013; 蒋文程等, 2017; 成曦晖等, 2017; Perelló et al., 2020; 赵凯等, 2020; Fu et al., 2021),但是针对该国西部碧沙成矿带的勘查研究工作还相对薄弱,区内尚无系统的区域地球化学勘查工作。GASH金矿集区位于厄立特里亚西南部毕沙成矿带南端,基于该地区1:10万水系沉积物地球化学测量数据,笔者采用多元统计方法分析区内Au及相关伴生元素的地球化学特征,并进行有利异常信息提取,结合地质成矿条件分析,对各异常的成矿潜力及找矿指示意义进行评价,为矿集区内的Au找矿远景区圈定及矿产勘查工作部署提供地球化学方面的依据。

## 1 区域地质概况

厄立特里亚自西向东可划分为Barka、Hagar、Adobha Abi、Nakfa与Arig等5个地体,Adobha Abi与Barka地体东侧为Baden剪切带(BSZ),与Nakfa地体呈韧性剪切带接触关系。其中,Nakfa地体主要由绿片岩相的变火山沉积岩和不同碰撞阶段的花岗岩组成(Stern, 1994; Teklay, 2003; 赵凯等, 2018; 向文帅等, 2021),研究区位于该地体的西南部(图1a)。

区内出露的地层主要为元古宙变质地层和全新世沉积物,元古宙的变质沉积岩的岩性主要为大理岩、

变质碎屑沉积岩和变砾岩等;全新世沉积物的类型可以分为冲积物、残坡积物和土壤层。

区内岩浆岩分布广泛,岩浆活动主要集中于元古代,岩性以中酸性为主,脉岩较为发育。粉色花岗岩在区内呈岩株和岩床产出,主要分布于研究区的南西、南部和东部,多被第四系覆盖,仅沿河床可见少量露头,岩石多呈红色,中细粒结构,块状构造,岩石风化破碎严重,局部节理、裂隙发育;变形花岗岩在区内大面积出露,该类侵入体在平面上多呈现NE向的分布特征;中性侵入岩则以片理化的闪长岩为主;此外区内有多处辉长岩、斜长辉石岩体等基性-超基性岩体出露;火山岩则是以古元古代岩石出露面积较大,主要由一套中性火山岩组成,岩性为安山岩、斑状安山岩、安山质凝灰岩、夹有少量的火山碎屑角砾岩,各类岩石之间界限不明显,呈渐变过渡关系;新生代火山岩主要以玄武岩为主,此外有少量长英质火山岩分布。

区域上NE向的韧性剪切带构成了本区的基本格架,控制着NE向和NEE向断层的展布,同时也控制了元古代岩浆岩的分布(图1b)。

## 2 样品采集与测试

GASH金矿集区1500 km<sup>2</sup>的1:10万水系沉积物地球化学测量于2019年完成,采样工作按照《区域地球化学勘查规范DZ/T 0167-2006》的要求开展,采样单元格为1 km×1 km,取样粒级为-20~80目,共采集1547件水系沉积物样品。样品分析测试工作由自然资源部武汉矿产资源监督检测中心承担,统一进行Au、Ag、As、Sb、Hg、Cu、Pb、Zn、W、Mo、Sn、Bi、Cr、Ni、Co、V、Ti、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO等39种元素分析测试,本次研究使用的Au数据采用ICP-MS分析方法,采样点位及19种常用元素的分析方法和检出限见图2。

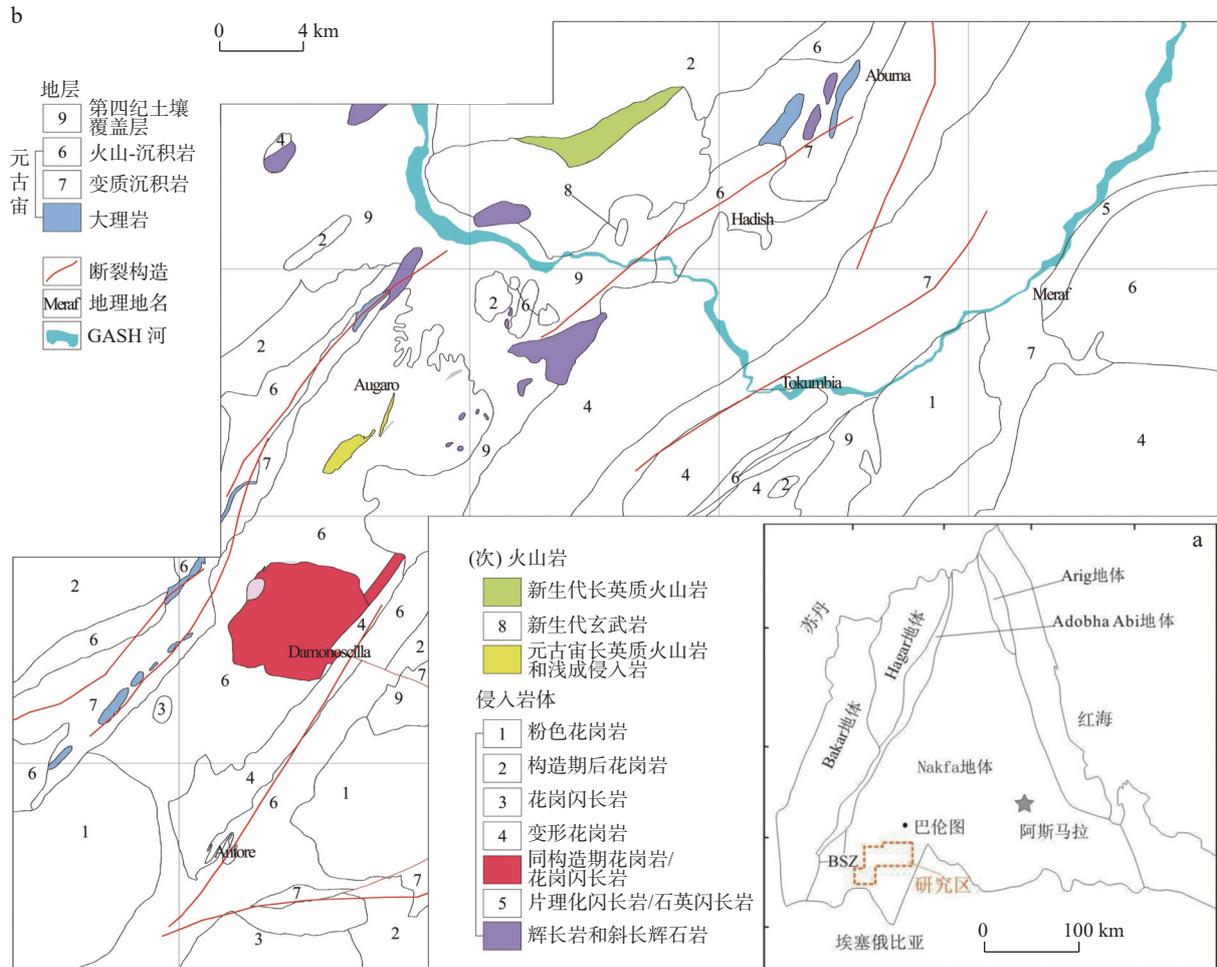


图1 研究区地质构造简图(图 a 据赵凯, 2018; 图 b 据 Greig, 2004)

Fig. 1 Brief geology map of study area

### 3 化探异常信息提取

#### 3.1 元素含量参数特征

对 19 种元素的富集系数、变异系数等特征地球化学参数进行统计(表 1),用以说明各元素在研究区的分布特征,结果显示主成矿元素 Au 及其他与热液活动相关的 Hg、Bi、W 等元素的变异系数达到 1.3 以上,呈强分异的分布特征,指示其在研究区地质体中存在明显的分散与富集,具有较好的成矿前景(袁和等, 2017; 徐云峰等, 2021), As、Cr 的变异系数为 1~1.3,同样存在较强的分异性,剩余元素的变异系数均在 1 以下,分异性相对较弱;相对于地壳克拉克值,研究区 Au、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的富集系数在 2 以上,表现为强富集分布, As、Sb、W、Mo、Cu 等元素的富集系数为 1.2~2,同样具有较强的富集特征。综上可知,研究区 Au 呈强富集-强分异的分布特征,显示出区内优异

的 Au 找矿前景,同时 W 及 As 也分别呈富集-强分异的分布特征,其对区内的 Au 矿勘查也具有一定的指示意义。

#### 3.2 Au 成矿选择性分析

本次研究在元古宙火山岩区、变质沉积岩区、花岗岩区、闪长岩区、辉长-辉石岩区等 5 个主要岩石单元各采集了 10 件反映其背景特征的岩石样品,并进行了与水系沉积物样品相同的测试分析,其中各岩石单元的 Au 含量特征见表 2。

由表 2 可见,元古宙中酸性侵入岩中 Au 含量明显高于其他岩石类型,其中闪长岩中 Au 含量均值为  $1.73 \times 10^{-9}$ ,花岗岩中 Au 含量均值为  $1.74 \times 10^{-9}$ ,达到其他岩石类型中 Au 含量的两倍及以上,说明区内 Au 成矿可能与岩浆侵入活动具有一定相关性。

#### 3.3 元素组合分析

成矿元素通过相应的成矿地质过程迁移、集聚、沉淀最终形成可供利用的矿产,具有相似地球化学特

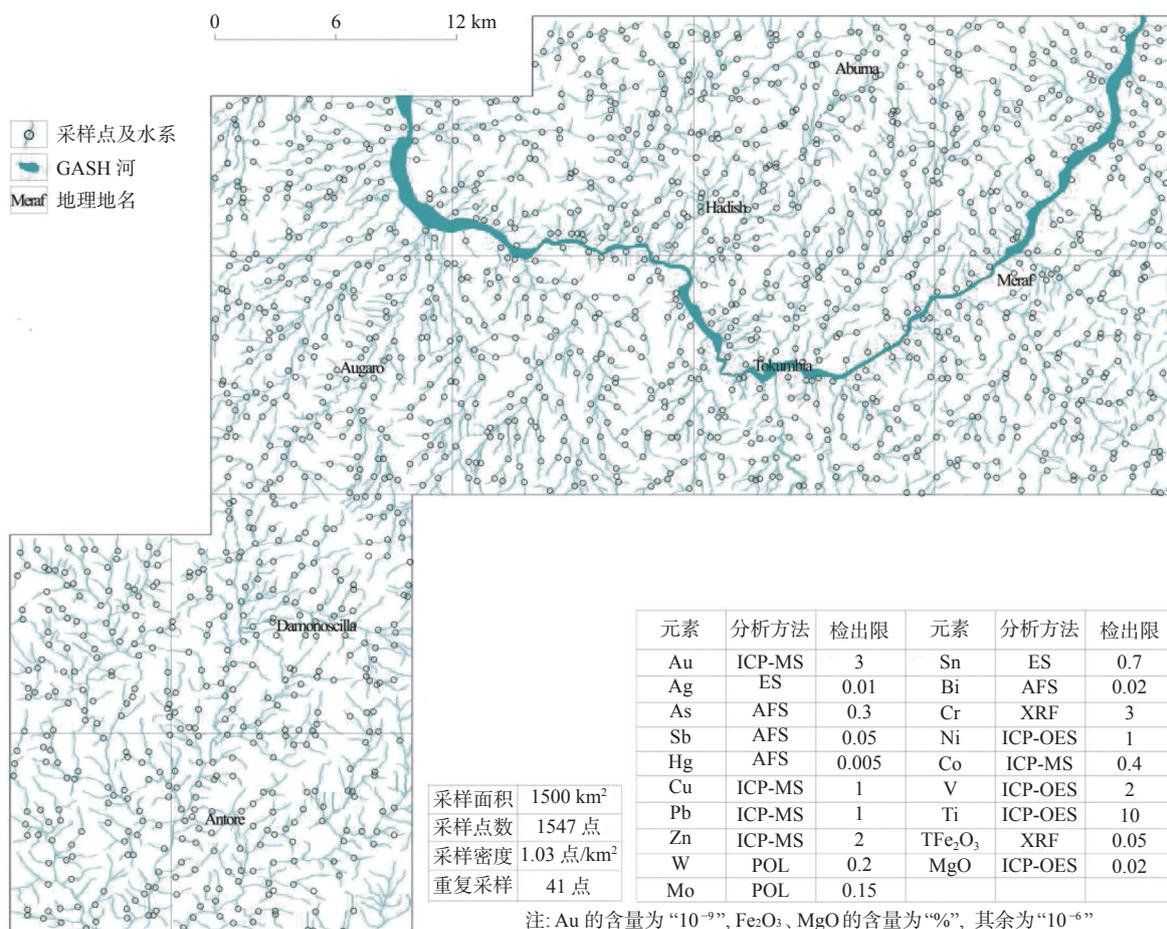


图2 研究区样品采集点位及分析方法

Fig. 2 Sample point distribution and analysis method in study area

表 1 各元素地球化学特征参数

Tab. 1 Statistical characteristics of elements geochemical values

元素	平均值	中值	最大值	均方差	克拉克值	变异系数	富集系数
Au	3.88	1.40	71.00	8.63	0.90	<b>2.22</b>	<b>4.32</b>
Ag	0.04	0.04	0.42	0.03	0.06	0.63	0.70
As	3.21	2.19	43.50	3.73	2.40	1.16	<b>1.34</b>
Sb	0.24	0.21	0.94	0.12	0.18	0.50	<b>1.34</b>
Hg	0.004 9	0.004	0.05	0.01	0.01	<b>2.24</b>	0.49
W	0.85	0.62	17.30	1.18	0.60	<b>1.40</b>	<b>1.41</b>
Mo	0.64	0.54	9.10	0.57	0.50	0.88	<b>1.29</b>
Bi	0.09	0.06	4.37	0.21	0.14	<b>2.22</b>	0.67
Sn	1.26	1.21	3.73	0.40	1.40	0.32	0.90
Cu	37.04	30.60	169.00	23.66	26.00	0.64	<b>1.42</b>
Pb	8.05	7.60	34.30	3.02	15.00	0.37	0.54
Zn	51.67	46.80	187.00	25.36	76.00	0.49	0.68
Co	19.41	15.60	207.00	17.12	19.00	0.88	1.02
Cr	65.24	48.60	879.00	74.63	76.00	1.14	0.86
Ni	27.29	20.50	256.00	24.27	31.00	0.89	0.88
Ti	4 422.00	4 114.00	26 651.00	2 550.00	4 000.00	0.58	1.11
V	129.22	117.00	804.00	72.53	112.00	0.56	1.15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.78	5.35	29.18	2.88	2.45	0.50	<b>2.36</b>
MgO	1.56	1.39	10.50	1.02	3.16	0.65	0.49

注: 粗体标注元素变异系数大于1.3, 富集系数大于1.2, 在特征参数分析工作中需重点关注。Au 含量为10<sup>-9</sup>; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO含量为%; 其余元素含量为10<sup>-6</sup>。

表 2 研究区主要岩石单元 Au 含量特征

Tab. 2 The Au content of main rock unit in study area

岩石单元	Au含量均值( $10^{-9}$ )	岩性特征
元古宙火山岩	0.95	岩性以蚀变安山岩为主, 在研究区广泛分布, 整体呈NE向展布
元古宙变沉积岩	0.82	岩石的片理化特征明显, 多与火元古宙山岩相邻分布, 呈NE向展布
花岗岩区	1.74	颜色较闪长岩浅, 常见构造变形特征, 整体呈NE向展布, 分布面积较大
闪长岩区	1.73	岩石具有明显的片理化特征, 颜色较花岗岩深, 区内分布面积相对较小
辉长-辉石岩区	0.61	岩石颜色较深, 矿物颗粒较大, 在区内呈零星分布

征的元素在空间分布上具有较强的关联性。相较于单元素分析, 多元素组合分析可以更加准确的反映出成矿及找矿指示元素在研究区内的分布特征, 化探数据处理中通常利用 R 型聚类或因子分析来研究各单元素间的相关性(刘亚剑等, 2008; 于俊博等, 2014; 杨龙坤等, 2015; 杨笑笑等, 2018), 文中结合上述两种分析方法对单元素进行处理并分类, 以揭示各元素在研究区不同地质单元中的富集及亲疏关系。

### 3.3.1 R 型聚类分析

利用 Pearson 相关系数来表征各元素(组合)间的亲疏关系。结果表明, 相关系数均在 0.6 以上的元素可主要分为 3 组: ①W-Mo-Bi 等高温热液元素组合。②As-Sb 等低温热液元素组合。③Co-Ni-Cr-MgO-V-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ti-Zn-Cu 等亲铁-亲硫元素组合, Au 与其他所有元素的相关性均较差, 元素 R 型聚类分析谱系图见图 3。

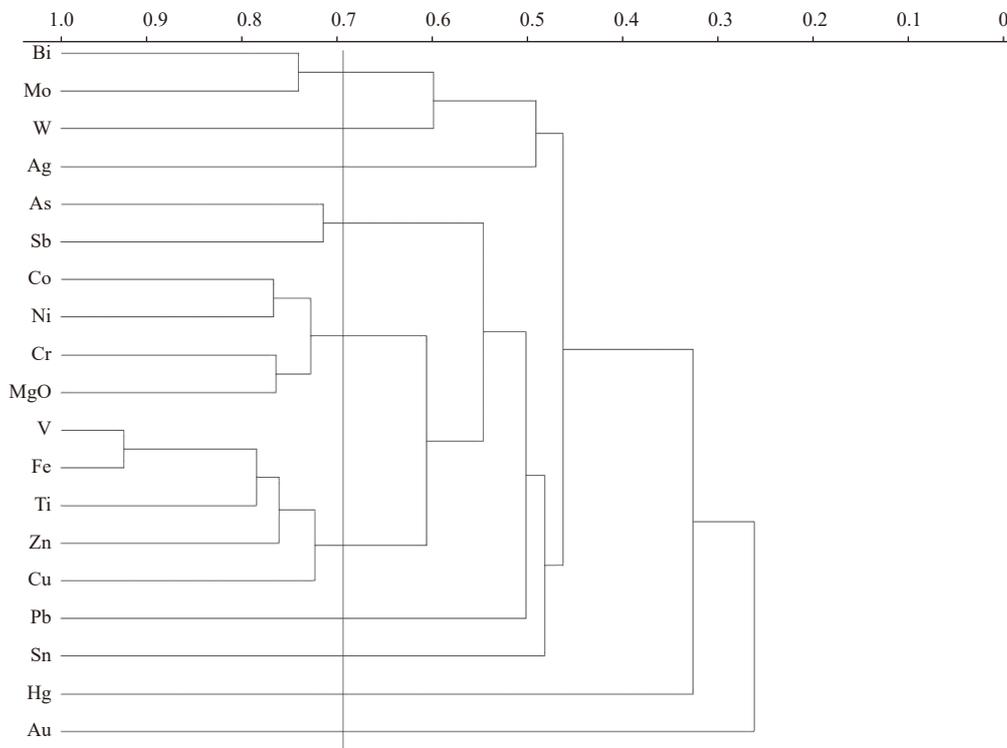


图3 元素 R 型聚类分析谱系图

Fig. 3 Pedigree diagram for R-type cluster analysis of all elements

### 3.3.2 因子分析

因子分析其实质为 R 型聚类分析的发展延伸, 同样是将多个单一变量进行降维(孔祥超等, 2023), 在

简化研究变量的同时, 保留原始变量中的主要信息, 其基础为选取的不同单一变量之间的相关性, 计算所得到的同一因子内的单一变量具有较好的相关性(刘

永胜等, 2023), 而不同因子之间的变量间的相关性则较差, 实际应用中会选择能表征大部分变量信息的主要因子进行分析讨论, 其余的变量则作为特殊因子(姚旺等, 2018)。对化探数据进行因子分析, 各主要因子包含的元素组合可以较好地厘定研究区内特定地质成矿作用, 利用各采样点位在不同主因子中的得分可以有效反映出不同类型元素组合在空间上的分布规律, 并作为成矿预测的有利依据(赵少卿等, 2012; 袁玉涛, 2015; 陈建平等, 2019)。其操作一般按照以下步骤开展: 原始数据标准化并求解相关系数矩阵、求解初始因子载荷矩阵、矩阵正交旋转、根据正交旋转因子载荷矩阵得出各因子表达式、通过个采样点位的因子得分开展综合评价工作(苏为华, 2000)。

本研究区内各元素的因子分析进行了 KMO 和 Bartlett 检验, 其中 KMO 值为  $0.88 > 0.6$ , Bartlett 球形度检验的显著性水平为  $0.00 < 0.05$ , 因此可判定数据之间的相关性较好, 适宜应用因子分析的方法对数据进行处理, 分析结果中特征值大于 1 的 5 个主因子的累积方差达到 72.06%, 说明这 5 个因子可提供原始数据的大部分信息, 可以有效包括 Au 在内的相关元素的含量变化特征, 具体因子特征参数见表 3, 其中 F1 主因子为 Ti-V-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu-Zn 等亲铁-亲硫元素组合、F2 主因子为 Ag-Bi-Mo-W 等中-高温热液元素组合、F3 主因子为 As-Sb-Pb 等中-低温热液元素组合、F4 主因子为 Co-Cr-Ni-MgO 等亲铁元素组合、F5 主因子为 Au-Hg 等主成矿指示元素组合。

表 3 因子分析特征参数统计

Tab. 3 Characteristic parameters of factor analysis

因子	因子特征值及方差贡献率			元素	正交旋转载荷矩阵				
	特征值	方差贡献率 (%)	累积贡献率 (%)		F1	F2	F3	F4	F5
F1	<b>6.66</b>	35.03	35.03	Ag	0.09	<b>0.68</b>	0.32	0.18	0.12
F2	<b>2.86</b>	15.08	50.11	As	0.10	0.02	<b>0.84</b>	0.14	0.04
F3	<b>1.61</b>	8.47	58.58	Bi	-0.06	<b>0.90</b>	-0.07	-0.05	0.11
F4	<b>1.54</b>	8.13	66.70	Co	0.14	0.08	0.52	<b>0.61</b>	0.06
F5	<b>1.02</b>	5.36	72.06	Cr	0.31	-0.02	-0.08	<b>0.82</b>	0.01
F6	0.91	4.81	76.87	Cu	<b>0.65</b>	0.32	0.43	0.14	0.13
F7	0.72	3.81	80.69	Hg	0.09	0.12	0.15	0.02	<b>0.75</b>
F8	0.54	2.86	83.55	Mo	0.06	<b>0.81</b>	0.18	0.03	0.10
F9	0.53	2.78	86.33	Ni	0.15	-0.01	0.20	<b>0.89</b>	0.01
F10	0.48	2.55	88.88	Pb	0.12	0.21	<b>0.61</b>	-0.04	0.08
F11	0.42	2.20	91.08	Sb	0.11	0.15	<b>0.88</b>	0.11	0.08
F12	0.35	1.83	92.91	Sn	0.52	0.30	0.28	-0.13	0.11
F13	0.30	1.59	94.51	Ti	<b>0.88</b>	0.05	0.17	0.01	0.07
F14	0.27	1.41	95.91	V	<b>0.79</b>	0.13	0.22	0.28	0.08
F15	0.22	1.14	97.06	W	-0.04	<b>0.80</b>	0.03	-0.03	0.10
F16	0.21	1.11	98.16	Zn	<b>0.82</b>	0.13	0.24	0.22	0.09
F17	0.20	1.06	99.22	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>0.85</b>	0.16	0.26	0.31	0.10
F18	0.08	0.44	99.67	MgO	0.52	0.05	-0.005	<b>0.71</b>	0.05
F19	0.06	0.33	100.00	Au	-0.001	0.17	0.03	0.04	<b>0.79</b>

注: 表中左侧粗体为特征值大于 1 的因子项, 反映数据主要信息的主因子; 右侧粗体反映 5 个主因子分别代表的元素载荷。

如前所述, 完成因子分析后, 可针对每个采样点位的因子得分对每个主因子开展综合评价, 提取其中的有利地质信息。

### 3.4 异常信息提取

选取 F5(Au-Hg 元素组合)主因子进行异常信息提取, 用于指导进一步的 Au 矿勘查工作。从地球化学场中提取的异常信息的准确性主要取决于异常下限的计算方法和取值(张宝一等, 2018), 而异常是

否能够反映出有利找矿信息则主要取决于其是否为矿致异常。异常下限的确定方法较多, 在实际生产中, 较主流的方法有累积频率法、迭代剔除算法、衬值滤波法(张小静, 2009)、分形法及在其基础上发展出的奇异性理论(Cheng, 2007)。利用迭代剔除计算的方法进行异常下限值确定, 异常下限根据原始数据进行均值 $\pm 2$ 倍标准差迭代剔除后的数据, 利用  $X(\text{均值}) \pm 2 \times S(\text{标准差})$  所对应的值(弱异常

阅值)为基准,按异常面积的多少适当提高或降低一个含量级别,作为异常下限值,采用异常下限含量的2倍、4倍作为异常中带和内带值,最终得出的F5因子异常分带值为0.25、0.5、1.0,数值无具体量纲。

#### 4 异常圈定及评价

根据异常下限值,初步圈定出F5因子的异常区

后,针对单点异常,仅保留极高值单点异常,针对无采样点的异常,则直接删除,最终圈定出10处F5(Au-Hg)因子异常,涵盖了区内包括Augaro、Antore、Hadish、Anagulu及Meraf砂金在内的已知Au矿床(点),异常均呈现出较好的NE、N-NE向展布特征,受断裂构造的控制明显,除3号异常外,其余9处F5(Au-Hg元素组合)异常均具有较好的三级浓度分带,具体异常分布见图4,现对各异常的特征和成矿潜力进行评价。

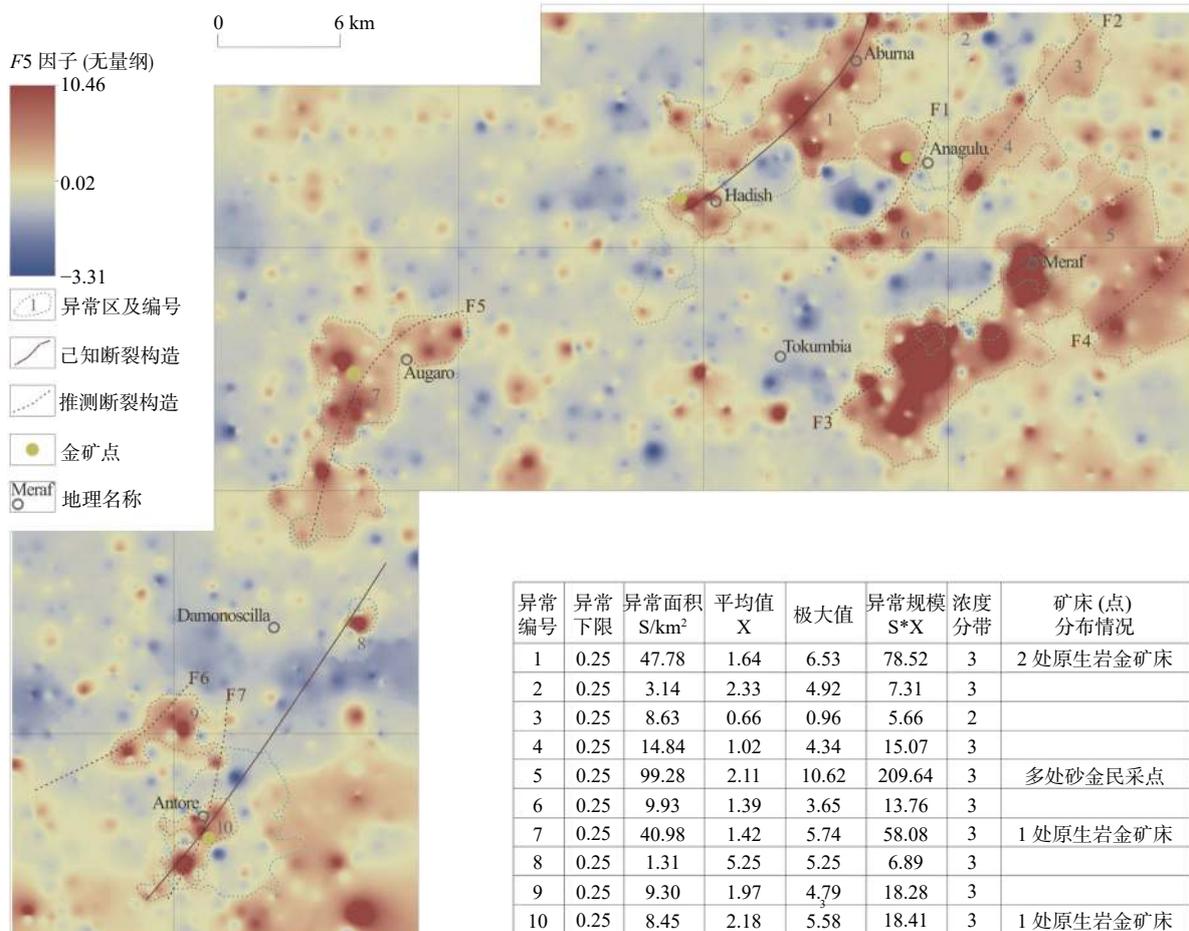
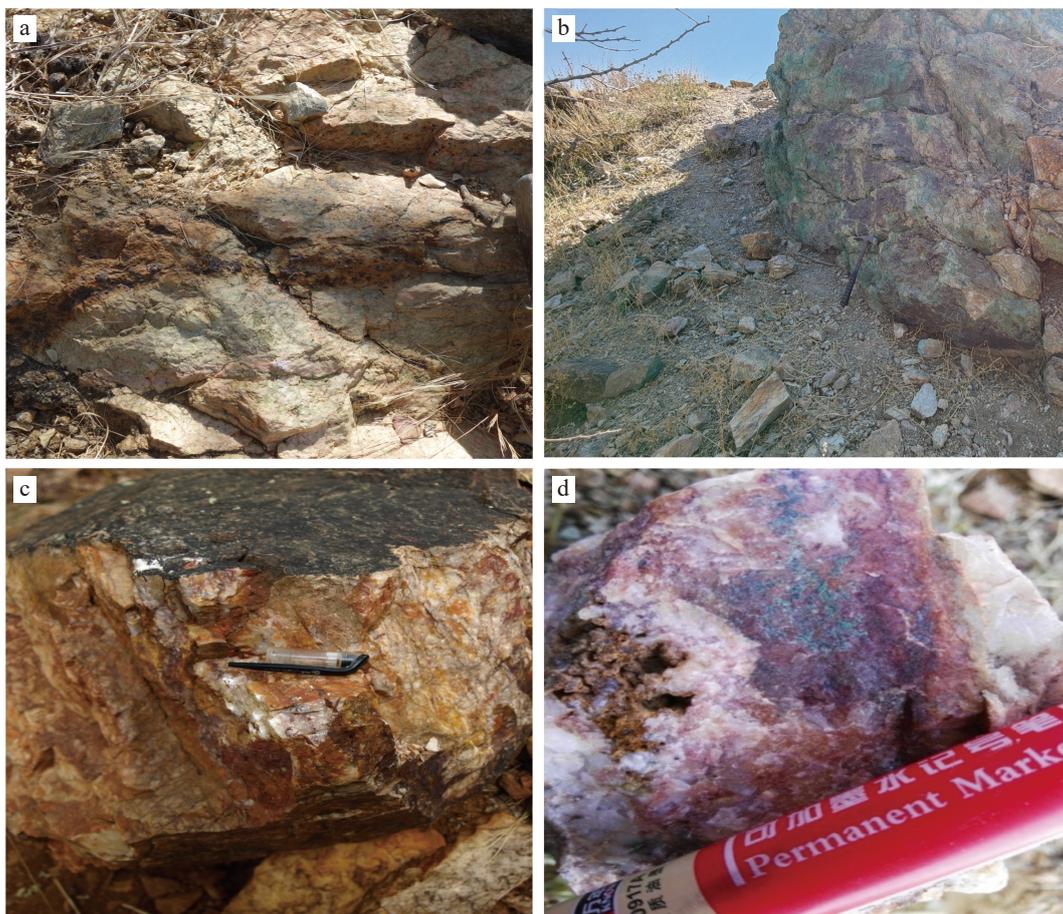


图4 F5因子(Au-Hg元素组合)得分等值线及异常分布特征

Fig. 4 Contour characteristic and anomaly distribution of F5 factor (Au-Hg association) score

1号异常位于研究区北部的Hadish-Aburna一带,面积达47.78 km<sup>2</sup>,呈NE向带状展布,三级浓度分带较好,有多个明显的浓集中心,异常强度较高,分布有Hadish及Anagulu两处金矿床,为典型的矿致异常,区内主要出露元古宙变质沉积岩及火山岩,同时辉长岩和斜长辉石岩等基性-超基性侵入岩体发育,NE向的区域主断裂构造穿过该异常区,区内多见矿化石英脉(图5a),显示出该区优异的Au找矿前景。

3号、4号及6号异常位于Anagulu以东的区域,整体呈NE向的串珠状展布,面积分别为8.63 km<sup>2</sup>、14.84 km<sup>2</sup>、9.93 km<sup>2</sup>,其中4号及6号异常具有较好的三级浓度分带特征,有多个明显的浓集中心,具有一定的异常强度,区内现无已知矿床(点),区内主要出露元古宙变沉积岩,在4号及6号异常区内,可见孔雀石化的斑状花岗岩(图5b),显示出一定的找矿潜力。



a.1号异常区矿化石英脉; b.4号和6号异常区孔雀石化的斑状花岗岩; c.7号异常区含金石英脉; d.10号异常区孔雀石化石英脉

图5 F5因子得分异常区地质矿化特征

Fig. 5 The geology and mineralization occurrence in F5 factor score anomaly area

5号异常位于研究区东部的 Meraf-Tokumbia 一带,异常同样呈明显的 NE 向带状展布,异常的强度和规模巨大,面积达  $99.28 \text{ km}^2$ , 浓集中心非常明显,异常点位均值和极值远大于异常下限值,其形成主要是由于该地区广泛分布的砂金矿导致水系沉积物中 Au 含量普遍较高,异常区地质体组成也相对复杂,主要有元古宙变沉积岩、火山岩及闪长岩和花岗岩等侵入岩体。

7号异常位于工作区西部的 Augaro 地区,异常整体呈 N-NE 向带状展布,面积达  $40.98 \text{ km}^2$ ,异常具有较好的三级浓度分带特征,强度较高,有多个明显的浓集中心, Augaro 石英脉型金矿床便位于该异常区,含金石英脉(图 5c)说明其为典型的矿致异常,具有较好的 Au 找矿前景,区内同样出露元古宙火山岩及变沉积岩,9号异常位于 Antore 以西的区域,面积达  $9.30 \text{ km}^2$ ,其地质背景与 7号异常相似,两处异常在空间分布上也具有一定的延续性,同样具有一定的找矿

前景。

8号及 10号两处异常位于西南部的 Antore-Damonoscilla 一带,区域 NE 向主断裂构造较好的穿过这两处异常,其中 8号异常为单点极高值异常,面积为  $1.31 \text{ km}^2$ , 10号异常成 NE 向的带状展布,面积  $8.45 \text{ km}^2$ ,三级浓度分带特征较好,具有多个明显的浓集中心, Antore 石英脉型金矿点便位于该异常区,区内孔雀石化的石英脉发育(图 5d),显示出两处异常具有较好的找矿前景,区内同样以出露元古宙火山岩及变沉积岩为主。

综上所述,本次圈定的 10处异常多位于元古宙变沉积岩及火山岩区,异常均具有明显的定向展布特征,显示出非常明显的构造控制特征,这与区域成矿规律也较吻合,异常区内矿化蚀变发育,除 3号异常的剩余 9处异常均具有较好的找矿前景,其总面积达  $235.13 \text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 15.67%,其中 5号异常为砂金矿的重点找矿远景区,面积为  $99.28 \text{ km}^2$ , 1~2、

4、6~10等8处异常为原生岩金矿的重点找矿远景区,面积为135.73 km<sup>2</sup>。

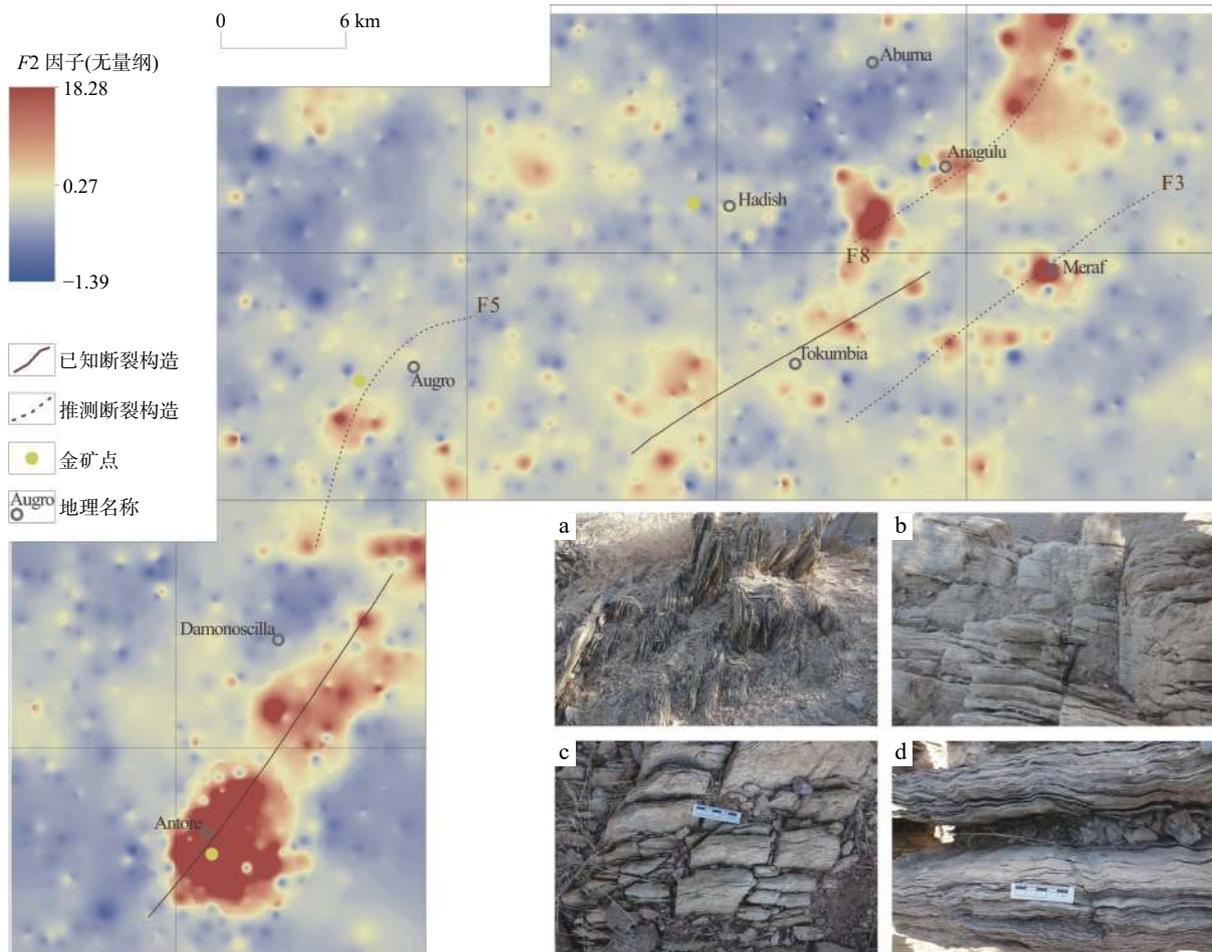
## 5 断裂构造推断

研究区的主要地质体及主体断裂构造均呈NE、N-NE向展布(图1),断裂构造作为开放性的构造体系,不仅可以控制岩体及地层的分布,同时对含矿热液流体的迁移和沉淀也具有非常明显的影响,导致其对元素异常的空间展布形态产生非常明显的控制作用(彭礼贵等,1995;李春华等,2010;窦小雨等,2022),如受热液活动控制明显的元素的含量在断裂带附近形成明显的浓度梯度,沿断裂带形成线状、串珠状或者带状展布的异常形态(吕古贤等,2011;张宝一等,2017;董凯,2018)。本次筛选出的5个主因子中,F1及F4主因子分别为Ti-V-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu-Zn等亲

铁-亲硫元素组合和Co-Cr-Ni-MgO等亲铁元素组合,其对基性-超基性组分含量相对较高的地质体空间分布具有很好的指示意义(向运川等,2014;刘旭洋,2021)。因此,笔者在此处选择F2、F3、F5等3个与热液活动关系密切的主因子进行分析,推断区内的断裂构造分布特征。

F5主因子作为重点研究成矿指示元素组合,在前述异常信息提取及评价中已作详细分析,基于10处Au-Hg元素组合异常的定向展布特征可较好推断出F1、F2、F3、F4、F5、F6、F7等断裂构造(图4)。

F2主因子(Ag-Bi-Mo-W元素组合)高值区展布形态相对简单,呈近NE向贯穿整个研究区,其中西南部的高值区呈NE向的带状展布,与该地区的已知NE向区域主断裂构造近乎重合,高值区内可见明显的NE向片理化构造(图6a),东北部的高值区呈多条NE向的串珠状展布,区内主要以出露元古



a.西南部高值区NE向片理化构造; b, c.东北部高值区NE向小型断裂构造; d.Augaro地区断裂构造

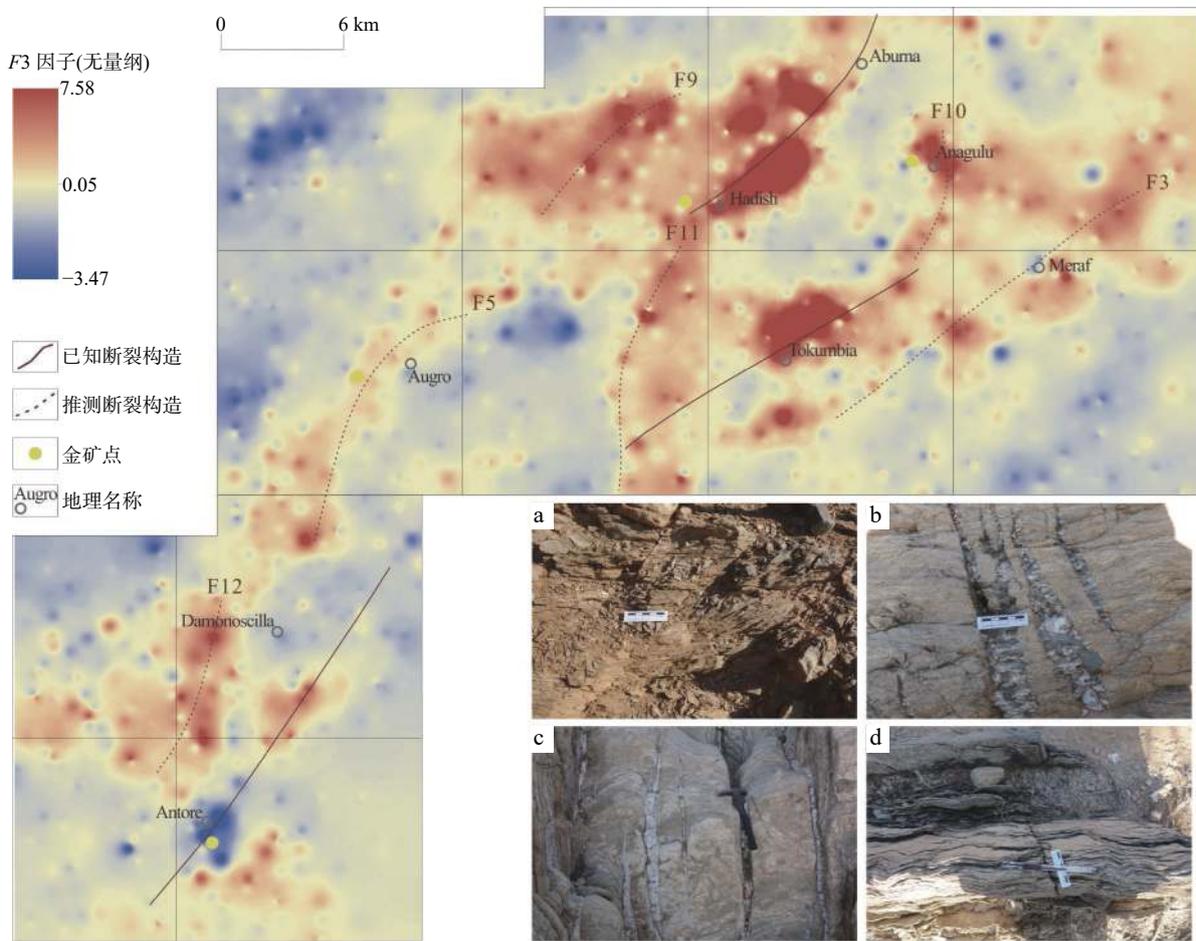
图6 F2因子(Ag-Bi-Mo-W元素组合)得分等值线特征及断裂构造推断

Fig. 6 Contour characteristic of F2 factor (Ag-Bi-Mo-W association) score and fault structure inference

宙变沉积岩为主,可推断出 NE 向断裂构造 F8,区内常见 NE 向的小型断裂构造(图 6b、图 6c),在西部的 Augaro 地区可见强度相对较弱的 N-NE 向高值区展布,据此推断出的 F5 断裂构造在 F3 及 F5 因子高值区分布中有非常好的体现,区内常见的断裂构造见图 6d。整体来看,Ag-Bi-Mo-W 中-高温热液元素组合的迁移活动能力相对较弱,高值区沿主断裂构造分布明显,对次级断裂构造的反映相对较差。

F3 主因子高值区的展布形态则相对较复杂,这主要是由于 As、Sb、Pb 等 3 种元素均为在热液活动中迁移能力较强的远程指示元素,其分布受区内的构造控制非常明显,最终致使其在平面的展布形态上表现

的相对复杂,但是其整体仍呈现出 NE、N-NE 向的定向展布的特征,东北部 Hadish-Aburna 一带分布的高值区较好的反映了近 NE 向的区域主断裂,区内常见 NE 向的片理化构造(图 7a),高值区主要位于元古宙变沉积岩及火山岩, Tokumbia-Anagulu 一带的高值区同样呈 NE 向的串珠状分区,区内可见的小断裂构造见图 7b、图 7c,在 Anagulu 处有金矿点出露,因此,推断有 F10 断裂的存在,西南部的 Damonoscilla 一带存在近 N-NE 向展布的高值区,该高值区与 Augaro 地区的高值区在空间分布上存在一定的延续性,均位于元古宙的变沉积岩区,区内可见的断裂构造见图 7d。因此,推断该区存在 F12 断裂构造。



a. Hadish-Aburna 一带 NE 向的片理化构造; b, c. Tokumbia-Anagulu 一带 NE 向断裂构造; d. Damonoscilla 一带 N-NE 向断裂构造

图 7 F3 因子(As-Sb-Pb 元素组合)得分等值线特征及断裂构造推断

Fig. 7 Contour characteristic of F3 factor (As-Sb-Pb association) score and fault structure inference

## 6 结论

(1)研究区内 Au-Hg-As-W-Bi 等元素呈强分异的

分布特征, Au-As-Sb-W 具有强富集分布特征,通过 R 型聚类及因子分析提取出相关性较强的 F1(Ti-V-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cu-Zn 亲铁-亲硫元素组合)、F2(Ag-Bi-Mo-W 中-高温热液元素组合)、F3(As-Sb-Pb 中-低温热液元

素组合)、F4(Co-Cr-Ni-MgO 亲铁元素组合)、F5(Au-Hg 主成矿元素组合)5组主因子。其中,F5因子异常覆盖了区内已知的所有 Au 矿床(点),对于 Au 矿勘查具有非常好的指示意义。

(2)选取 F5 因子(Au-Hg 元素组合)开展异常信息提取,有效圈定出反映区内原生岩金及砂金矿床(点)分布的异常 10 处,通过各异常区的地球化学特征和 Au 地质矿化信息的综合分析,确定出 8 处具有较好的原生岩金矿勘查前景的异常区,总面积为 135.73 km<sup>2</sup>。

(3)选取 F2、F3、F5 等 3 组主因子对区内的断裂构造进行了推断。其中,F2 主因子(Ag-Bi-Mo-W 元素组合)主要代表迁移活动能力相对较弱的中-高温热液元素,高值区主要反映了已知区域主断裂构造的分布;F3 主因子(As-Sb-Pb 元素组合)、F5 主因子(Au-Hg 元素组合)主要代表迁移活动能力相对较强的中-低温热液元素,其高值形态特征相对复杂,对区域次级断裂构造具有较好的反映。

致谢:野外工作中得到王建雄正高级工程师、雷义均正高级工程师、吴发富高级工程师、向鹏高级工程师、张奋翔高级工程师的帮助,在此一并感谢。

## 参考文献(References):

- 陈建平. 深地矿产资源定量预测理论与方法[M]. 北京:地质出版社,2019.
- CHEN Jianping. Theory and method of quantitative prediction of deep mineral resources[M]. Beijing: Geological Publishing House,2019.
- 成曦晖,徐九华,王建雄,等.厄立特里亚阿斯马拉 VMS 矿床 S、Pb 同位素对成矿物质来源的约束[J].中国有色金属学报,2017,27(4):795-810.
- CHENG Xihui, XU Jiuhua, WANG Jianxiong, et al. Sulfur and lead isotope constrains on source of ore-forming materials in Asmara VMS-type deposits, Eritrea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(4): 795-810.
- 董凯.甘肃白银厂铜矿成岩-成矿环境及其找矿意义[D].武汉:中国地质大学,2018.
- DONG Kai. Diagenesis-metallogenic environment of Baiyinchang copper deposit and its prospecting significance in Gansu[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- 窦小雨,郭小刚,周宏,等.甘肃白银厂铜多金属矿田地球化学场特征及信息提取[J].地质与勘探,2022,58(6):1139-1153.
- DOU Xiaoyu, GUO Xiaogang, ZHOU Hong, et al. Geochemical field characteristics and information extraction of the Baiyinchang copper polymetallic ore field in Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58(6): 1139-1153.
- 蒋文程,张有军,谭宁,等.厄立特里亚阿斯马拉(Asmara)铜金多金属成矿带研究进展[J].矿产勘查,2017,8(4):700-707.
- JIANG Wencheng, ZHANG Youjun, TAN Ning, et al. Progress of geological study in Asmara copper-gold polymetallic metallogenic belt, Eritrea[J]. *Mineral Exploration*, 2017, 8(4): 700-707.
- 孔祥超,万鹏,卢文姬,等.新疆东昆仑大沙沟地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向研究[J].西北地质,2023,56(4):116-127.
- KONG Xiangchao, WAN Peng, LU Wenji, et al. Geochemical Characteristics and Ore-prospecting of Dashagou Area in East Kunlun, Xinjiang: Based on Stream Sediment Survey[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 116-127.
- 刘亚剑,范继璋,李钟山,等.吉林省小石人金矿区微量元素地球化学特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2008,38(2):202-210.
- LIU Yajian, FAN Jizhang, LI Zhongshan, et al. Geochemical characteristics of trace elements in the Xiaoshiren gold deposit in Jilin Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(2): 202-210.
- 刘永胜,罗先熔,曹佰迪,等.甘肃省礼县三峪地区土壤地球化学特征及找矿预测[J].西北地质,2023,56(6):340-351.
- LIU Yongsheng, LUO Xianrong, CAO Baidi, et al. Soil Geochemical Characteristics and Prospecting Prediction in Sanyu Area, Li County, Gansu Province[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 340-351.
- 刘旭洋.湖南溆浦地区水系沉积物地球化学低弱异常识别[D].长春:吉林大学,2021.
- LIU Xuyang. Identification of weak geochemical anomalies of stream sediments in Xupu, Hunan Province[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- 李福林,向文帅,王成刚,等.东北非重要铜金矿产资源分布及赋存形式[J].地质通报,2022,41(1):119-128.
- LI Fulin, XIANG Wenshuai, WANG Chenggang, et al. Distribution and occurring state of copper-gold mineral resources in Northeast Africa[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 119-128.
- 李春华,路来君,王抵修.地球化学元素空间定量组合求异模型及其应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2010,40(2):461-468.
- LI Chunhua, LU Laijun, WANG Dixiu. The combination of geochemistry elements in space quantitative of different model and its application[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science*

- Edition), 2010, 40(2): 461–468.
- 吕古贤, 孙岩, 刘德良, 等. 构造地球化学的回顾与展望[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(4): 479–494.
- LV Guxian, SUN Yan, LIU Deliang, et al. Tectono-geochemistry: A review[J]. *Geotectonic et Metallogenia*, 2011, 35(4): 479–494.
- 彭礼贵, 任有祥, 李智佩, 等. 甘肃白银厂铜多金属矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- PENG Ligui, REN Youxiang, LI Zhipei, et al. Metallogenic model of Baiyinchang copper polymetallic deposit in Gansu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.
- SU Weihua. Research on the theory and method of multi-index comprehensive evaluation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2000.
- 向文帅, 赵凯, 曾国平, 等. 东北非 VMS 矿床地质特征与研究进展[J]. *地质通报*, 2022, 41(1): 129–140.
- XIANG Wenshuai, ZHAO Kai, ZENG Guoping, et al. Geology of VMS deposits in Northeast Africa and their research progress [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 129–140.
- 向鹏, 王建雄. 厄立特里亚 Koka 金矿地质特征及矿床类型[J]. *矿物学报*, 2013, (s2): 1067–1068.
- XIANG Peng, WANG Jianxiong. Ore geology character and type of Koka gold deposit, Eritrea[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, (s2): 1067–1068.
- 向文帅, 赵凯, 张紫程. 厄立特里亚 Augaro 金矿床碳氢氧硫同位素特征及其成因意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(4): 1284–1291.
- XIANG Wenshuai, ZHAO Kai, ZHANG Zicheng. Studies on C-H-O-S isotopes of Eritrea Augaro gold deposit and its implications for gold genesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(4): 1284–1291.
- 向运川, 龚庆杰, 刘荣梅, 等. 区域地球化学推断地质体模型与应用-以花岗岩类侵入体为例[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2609–2618.
- XIANG Yunchuan, GONG Qingie, LIU Rongmei, et al. Model and application of deducing geological body on regional geochemical survey data: A case study on granitic intrusions in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2609–2618.
- 徐云峰, 郝雪峰, 秦宇龙, 等. 四川盆河地区水系沉积物地球化学特征及找矿方向[J]. *物探与化探*, 2021, 45(3): 624–638.
- XU Yunfeng, HAO Xuefeng, QIN Yulong, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in Chahe area of Sichuan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(3): 624–638.
- 姚华舟, 李建星, 吕鹏瑞, 等. 海上丝绸之路沿线陆域地质演化与成矿[J]. *华南地质与矿产*, 2019, 35(1): 1–19.
- YAO Huazhou, LI Jianxing, Lv Pengrui, et al. Geological Evolution and Metallogenesis of the Land Area Along the Maritime Silk Route[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(1): 1–19.
- 姚旺, 卞姗姗, 余先川. 基于 IFA 的组合分析算法及其在矿产预测中的应用[J]. *地质学刊*, 2018, 42(4): 623–631.
- YAO Wang, BIAN Shanshan, YU Xianchuan. IFA-based combination analysis algorithm and its application in mineral prediction[J]. *Journal of Geology*, 2018, 42(4): 623–631.
- 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 He, LUO Xianrong, LI Wuyi, et al. Geochemical characteristics of soil and prospecting prediction of the Bangzhuoma Region, Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(3): 472–481.
- 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 Junbo, SONG Yuntao, GUO Zhijuan, 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.
- 杨龙坤, 罗先熔, 文美兰, 等. 地电提取测量法在黑龙江金厂外围区寻找隐伏金矿的应用[J]. *桂林理工大学学报*, 2015, 35(4): 809–816.
- YANG Longkun, LUO Xianrong, WEN Meilan, et al. Application of geoelectric extraction method on prospecting for hidden gold deposit in peripheral area of Jinchang, Heilongjiang[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2015, 35(4): 809–816.
- 杨笑笑, 罗先熔, 郑超杰, 等. 衡阳盆地北缘国庆矿区土壤地球化学特征及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(4): 762–771.
- YANG Xiaoxiao, LUO Xianrong, ZHENG Chaojie, et al. Geochemical characteristics of soil and prospecting direction in the Guoqing area, northern margin of the Hengyang Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(4): 762–771.
- 袁玉涛. 化探数据处理方法对比研究-以乌日尼图钨钼矿床为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- YUAN Yutao. Comparative Study on the Geochemical Exploration Data Processing Method: a Case of Wurunitu W-Mo Deposit [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 赵凯, 姚华舟, 王建雄, 等. 厄立特里亚 Koka 花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(1): 156–167.
- ZHAO Kai, YAO Huazhou, WANG Jianxiong, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Koka granites and their geological significances, Eritrea[J]. *Earth Science*, 2020, 45(1): 156–167.
- 赵凯, 姚华舟, 王建雄, 等. 厄立特里亚 Koka 金矿床成矿流体特

- 征及其地质意义[J]. *矿床地质*, 2018, 37(6): 1337–1348.
- ZHAO Kai, YAO Huazhou, WANG Jianxiong, et al. Characteristics of ore-forming fluids of Koka gold deposit in Eritrea and their geological significances[J]. *Mineral Deposits*, 2018, 37(6): 1337–1348.
- 赵少卿, 魏俊浩, 高翔, 等. 因子分析在地球化学分区中的应用: 以内蒙古石板井地区 1: 5 万岩屑地球化学测量数据为例[J]. *地质科技情报*, 2012, 31(2): 27–34.
- ZHAO Shaoqing, WEI Junhao, GAO Xiang, et al. Factor analysis in the geochemical subdivisions: taking 1: 50000 debris geochemical survey in the Shibanjing area of Inner Mongolia as an example[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2012, 31(2): 27–34.
- 张宝一, 陈伊如, 黄岸烁, 等. 地球化学场及其在隐伏矿体三维预测中的作用[J]. *岩石学报*, 2018, 34(2): 352–362.
- ZHANG Baoyi, CHEN Yiru, HUANG Anshuo, et al. Geochemical field and its roles on the 3D prediction of concealed ore bodies[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(2): 352–362.
- 张宝一, 代鹏遥, 蒙菲等. 基于距离场的三维矿体模型与地表化探数据的关联关系分析-以红透山铜矿田为例[J]. *地质论评*, 2017, 63(2): 511–524.
- ZHANG Baoyi, DAI Pengyao, MENG Fei, et al. Weighted shortest-distance field-based relation analysis between 3D ore-body model and geochemical survey data on the ground surface-A case study in the Hongtoushan copper ore field, Fushun, China[J]. *Geological Review*, 2017, 63(2): 511–524.
- 张小静. 西昆仑地区地球化学异常识别及最小预测区划分[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- ZHANG Xiaojing. The identification of geochemical anomalies and delineation of prospective mineralization areas in the region of West Kunlun[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- Cheng Qiuming. Mapping singularities with stream sediment geochemical data for prediction of undiscovered mineral deposits in Gejiu, Yunnan Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2007, 32(1-2): 314–324.
- Greig C J. Preliminary Regional Geology of Augaro Area[R]. Nevsun Exploration Company, 2004.
- Ghebream W, Greiling R O, Solomon S. Structural setting of Neoproterozoic mineralization, Asmara district, Eritrea[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2009, 55: 219–235.
- Guiraud R, Bosworth W, Thierry J, et al. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa: An overview[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 43(1/3): 83–143.
- Johnson P R, Andresen A, Collins A S, et al. Late Cryogenian-Ediacaran history of the Arabian-Nubian Shield: A review of depositional, plutonic, structural, and tectonic events, in the closing stages of the northern East African Orogen[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2011, 61(3): 167–232.
- Johnson P R, Zoheir B A, Ghebream W, et al. Gold-bearing volcanogenic massive sulfides and orogenic-gold deposits in the Nubian Shield[J]. *South African Journal of Geology*, 2017, 120: 63–76.
- Perelló J, Sillitoe R H, Brockway H, et al. Metallogenic inception of the Arabian-Nubian Shield: Daero Paulos porphyry copper prospect, Eritrea[J]. *Gondwana Research*, 2020, 88: 106–125.
- FU C, Chen K, Yang Q, et al. Mapping gold mineral prospectivity based on weights of evidence method in southeast Asmara, Eritrea[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, 176: 104–143.
- Stern R J. Neoproterozoic (900~550 Ma) arc assembly and continental collision in the east Africa orogen: implications for the consolidation of Gondwanaland[J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 1994, 22: 319–351.
- Teklay M. A Back-arc Palaeotectonic Setting for the Augaro Neoproterozoic Magmatic Rocks of Western Eritrea[J]. *Gondwana Research*, 2003, 6: 629–640.