

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.01.004

地球化学块体理论在厄立特里亚铜资源潜力预测中的应用

向文帅^{1,3}, 姜军胜^{1,3*}, 赵凯^{1,3}, 曾国平^{1,3}, Ermias Yohannes², Tesfai Berhe²

XIANG Wen-Shuai^{1,3}, JIANG Jun-Sheng^{1,3*}, ZHAO Kai^{1,3}, ZENG Guo-Ping^{1,3},
ERMIAS Yohannes², TESFAI Berhe²

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. 厄立特里亚地质调查局, 厄立特里亚 阿斯马拉 P.O. Box 272; 3. 中国-非洲地学合作中心, 湖北 武汉 430205

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China;
2. Eritrea Geological Survey, Asmara P.O. Box 272, Eritrea; 3. China-Africa Geoscience Cooperation Center, Wuhan 430205, Hubei China

摘要: 新元古代东非造山运动在厄立特里亚阿拉伯-努比亚地盾区形成了大面积出露的变质火山沉积岩系及相应的花岗岩岩浆岩, 与之相关的铜矿资源非常丰富。本文以厄立特里亚1:100万水系沉积物地球化学数据样本为基础, 应用地球化学块体理论, 对该国铜资源潜力进行预测。厄立特里亚共圈定地球化学块体7个, 地球化学区域异常5个, 地球化学块体的铜元素异常下限值为 28×10^{-6} 。根据不同成矿带内已知铜矿床的资源量推算各区块铜的成矿率, 以1 km矿床勘探深度为准则预测各区块潜在铜金属量, 估算出厄立特里亚潜在铜资源为930.76万吨。其中, 5、6号铜地球化学块体可作为下一步铜矿勘查的重点区域, 1、2、3、4、7号铜地球化学块体的找矿潜力也值得注意。

关键词: 地球化学块体; 铜矿; 资源潜力预测; 厄立特里亚

中图分类号: P612; P632+.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)01-0063-12

Xiang W S, Jiang J S, Zhao K, Zeng G P, Ermias Y and Tesfai B. 2024. Application of Geochemical Block Method in the Potential Prediction of Copper Resources in Eritrea. *South China Geology*, 40(1):63-74.

Abstract: The Neoproterozoic East African orogeny formed a large area of exposed metavolcanic sedimentary rock series and corresponding granitic magmatic rocks in the Arab-Nubian Shield, Eritrea, in which the copper resource is very rich. In this paper, 1:1000000 stream sediment geochemical data in Eritrea was selected as the research object. Based on the theory of geochemical block method, we synthetically evaluated the Cu resource potential of Eritrea. The result of geochemical data shows that the value of geochemical anomaly threshold is 28×10^{-6} . Seven geochemical blocks and five regional anomalies were delineated. According to the reserves of known deposits in different metallogenic belts, the mineral coefficient of Cu in each area was calculated. The total copper tonnage and mineral resources in each area were calculated based on the exploration depth of the 1 km. Thus, we inferred that the total copper tonnage in the 7 geochemical blocks and 5 regional geochemical anomalies of Eritrea (given a 1 km thickness of every rock mass) is 9.3076 million tons. Among

收稿日期: 2023-7-11; 修回日期: 2023-8-12

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2022CFB850)、中国地质调查局项目(DD20230575, DD20221802, DD20190443)

第一作者: 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: 姜军胜(1991—), 男, 博士, 主要从事境外地质矿产调查与研究工作, E-mail: 850044300@qq.com

them, geochemical blocks 5 and 6 should be used as the focus of the next step, and the exploration potential in geochemical blocks 1, 2, 3, 4 and 7 should also be noted.

Key words: geochemical block; copper deposit; mineral resources forecast; Eritrea

勘查地球化学作为一种重要的找矿手段,其为推动世界矿产资源勘查发挥了重大作用(王学求, 2013)。为突破勘查地球化学从其诞生之日就局限在研究局部的分散晕与分散流的框架,实现从局部到区域、从国家到全球更为宽阔的地球化学勘查模式,地球化学块体理论作为一种更大范围的勘查预测手段应运而生。地球化学块体是指垂向上具有一定的深度(通常为1 km)、面积等于或大于1000 km²的具有金属高含量的巨大金属异常块体(刘大文, 2002; 谢学锦等, 2002)。由于大型矿床/矿集区的形成需要巨量的成矿物质供应,因此,在大型矿床、矿集区的周围应该存在提供成矿物质的地球化学块体。王学求等(2007)认为利用低密度地球化学填图可以追索具有高金属含量的地球化学块体,结合块体内已知的矿产资源量等有利地质信息,可以确定某种金属的成矿率,进而预测块体内的资源潜力(谢学锦等, 1999; 刘大文等, 2002; 李堃等, 2013)。同时,地球化学块体理论在资源量预测、成矿潜力分析方面的应用,有利于缩小找矿靶区,在研究程度较低的工作区内实现找矿突破。

近年来,中国地质调查局与厄立特里亚地质调查局合作,在该国全境内开展了低密度1:100万地球化学填图,采集了该国主要水系沉积物,分析了样品中69种元素含量,为开展矿产潜力评价工作奠定了重要基础。厄立特里亚主体位于晚前寒武纪到早古生代的东非造山带北缘部分,区内广泛出露新元古代地质体(Johnson et al., 2017; Stern and Johnson, 2019)。截止目前,该国境内已发现众多矿产资源,主要包括铜、金、锌、镍、铬、铁、钾盐和石灰岩等矿种,以铜、金为主,矿床类型包括火山块状硫化物型(VMS型)铜金多金属矿床、斑岩型铜金矿床、造山型金矿床等。典型铜多金属矿床有Bisha、Debarwa、Adi Nefas、Emba Derho、Karora、Dukambiyo、Zarade、Daero Paulos(Barrie et al., 2016)。初步的调查研究显示,该国具有较大的找矿潜力(赵忠孝等, 2012)。本文基于地球化

学块体理论和方法,利用厄立特里亚低密度地球化学填图数据对该国的Cu资源进行了初步估算与预测。

1 区域地质矿产概况

厄立特里亚是阿拉伯-努比亚地盾的重要组成部分(图1a),而阿拉伯-努比亚地盾代表了东非造山带的北部地区,其主体洋内岛弧/弧后盆地复合体和沿北东走向的缝合带拼接的微板块组成(Stern, 1994; Stern and Johnson, 2010; Johnson et al., 2011)。新元古代以来,伴随着罗迪尼亚超大陆裂解(900~800 Ma),形成了Mozambique大洋。由于海底扩张运动,其先后经历了大洋俯冲、岛弧形成及弧后裂解作用(>700 Ma)。洋陆碰撞之后,西冈瓦纳大陆与东冈瓦纳大陆发生陆陆碰撞(700~620 Ma),随后发生了碰撞之后的走滑伸展作用(620~550 Ma)(向文帅等, 2020; 姜军胜等, 2021)。

厄立特里亚出露的地质体总体由前寒武纪基底岩石和不整合于其上的中生代沉积岩、新生代火山岩和沉积岩组成(Teklay, 1997)。前寒武纪基底岩石覆盖了厄立特里亚约60%的国土,广泛分布在该国的西部、中部及东部地区,主要由新元古代(870~550 Ma)大陆边缘弧岩浆岩构成。厄立特里亚西部的Barka群主要由达角闪岩相的变质沉积岩和镁铁质片岩组成,北部的Hagar群岩性主要为浅变质基性-超基性岩,西部边缘可见蛇绿岩,该区内因勘探铬、铂族元素、镍、金和铜矿产而闻名,Nakfa群面积最大,岩石组合为花岗岩-绿岩带,东部Arig群主要为花岗岩和变沉积岩,南部Danakil群包括混合岩化角闪黑云片麻岩、千枚岩组合以及花岗岩(De Sousa Filho and Drury, 1998; Teklay et al., 2001)。Hagar群、Nakfa群为变质程度极低的海相火山-沉积岩,包含少量新元古代同碰撞和后碰撞花岗岩,代表残余岛弧及弧后盆地沉积建造(Teklay, 2006),区内地层展布与韧性剪切带方向

一致,均为北北东向。

中生代沉积岩主要出露在该国南部和东南部,以砂岩、粉砂岩为代表,局部见侏罗纪 Adailo 灰岩。厄立特里亚新生代地质体以火山岩和沉积岩为主。古近系和新近系主体为中基性熔岩、碎屑岩等,沉积岩为灰岩、含砾砂岩、粉砂岩等;第四系主体为蒸发岩、粉砂岩、砂岩及风成沙,包含极少量的火山物质。区域构造活动较为强烈,主要为一系列断层及褶皱构造。侵入岩相对较少,主要为分布在该国中东部的中新元古代花岗岩,其形成多与该时期的构造活动密切相关(Andersson et al., 2006)。

厄立特里亚目前发现的矿产资源主要产于北北东向的碧莎(Bisha)和北北西向的阿斯玛拉(As-

mara)两个铜多金属成矿带中(图1b),由 Bisha(碧莎)、Koka、Debarwa、Adi Nefas、Emba Derho 和 Daero Paulos 等矿床组成。两个成矿带均处于纳克法(Nakfa)地体中。其中,铜多金属矿的成矿作用与新元古代浅变质的中基性火山岩、火山碎屑岩及相关的酸性岩浆活动密切相关,赋矿围岩为变火山岩、火山碎屑岩夹沉积岩(Ghebreab et al., 2009; Hood et al., 2019; Perelló et al., 2020)。矿床类型包括以碧莎(Bisha)和阿斯玛拉(Asmara)铜多金属矿床(表1)为代表的火山块状硫化物型(VMS型)矿床和以 Daero Paulos、Anagulu 为代表的斑岩型铜矿床,已知的主要矿床(点)在空间上呈北北东和北北西向展布(向文帅等, 2019)。

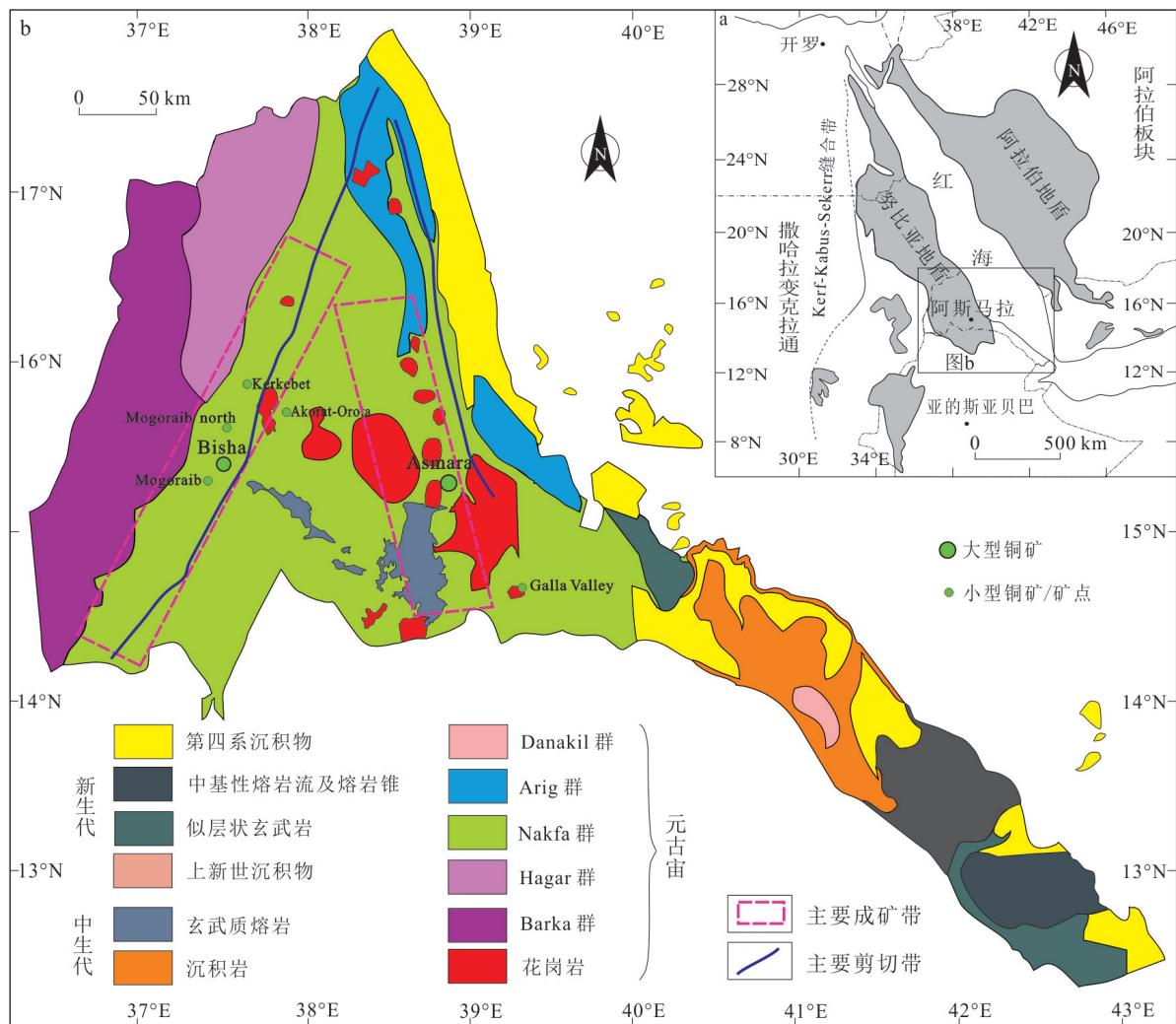


图1 阿拉伯-努比亚地盾地区地质简图(a)及厄立特里亚地质图(b)

Fig.1 Regional geological sketch of the Arab-Nubian Shield region(a) and geological map of Eritrea(b)

a图据 Johnson et al. (2011)修改; b图据赵凯等(2018)修改

表1 厄立特里亚代表性VMS型铜多金属矿床

Table 1 The representative VMS type copper polymetallic deposits in Eritrea

矿床	矿床地质特征	矿石特征	围岩特征	资源量	品位
碧莎 (Bisha)	该矿床主要赋存于Nakfa群的一套双峰式火山岩系中。矿体为经历了褶皱的厚层状矿体。受近地表风化和氧化作用,形成4个矿化分带,从上往下依次为:①氧化带,主要为Au、Ag矿化;②淋滤带,主要为Au、Ag、Pb矿化;③次生带,主要为Cu矿化;④原生块状硫化物带,主要为Zn、Cu矿化。	矿石矿物主要有辉铜矿、斑铜矿、方辉铜矿、闪锌矿、方铅矿、自然金、银金矿、深红银矿;脉石矿物主要有石英、绿泥石、绢云母-白云母、粘土矿物、菱铁矿、重晶石、碳酸盐矿物。	主要为不同程度蚀变的长英质凝灰岩、长英质火山角砾岩等。	铜 80 万吨, 锌 309 万吨。	铜品位: 0.97%, 锌品位: 3.75%
阿斯玛拉 (Asmara)	该矿床主要赋存于陡倾的层状火山岩及沉积岩中,包括5个矿段,主要有近地表金-银氧化带、贵金属水平矿化带(过渡带)、表层次生铜锌淋滤带和原生硫化物带4个矿化带。	矿石矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、针铁矿、辉铜矿、蓝辉铜矿等;脉石矿物主要有粘土矿物、石英、菱铁矿、方解石、石膏等。	主要为钙碱性火山岩、火山碎屑岩及变沉积岩,局部被花岗岩侵入。	铜 69 万吨, 金 42 吨, 锌 112 万吨, 银 899 吨。	铜品位: 0.75%, 金品位: 0.47×10^{-6} , 锌品位: 1.22%, 银品位: 10.11×10^{-6} 。

表2 厄立特里亚Cu元素统计参数及校正系数

Table 2 Statistics parameter and correction coefficient of copper element in the Eritrea

统计参数	非玄武岩区	玄武岩区
数量(个)	579	82
均值($\times 10^{-6}$)	21.7	59.4
背景值($\times 10^{-6}$)	19.2	54.9
标准差($\times 10^{-6}$)	9	25.3
校正系数	1(基准值)	0.35

注:背景值、标准差参数是迭代剔除3倍标准差以外的离散点后求得。

2 铜地球化学块体的圈定

2.1 数据的预处理

本次研究的数据样本来源于厄立特里亚1:100万水系沉积物地球化学调查,控制面积达9.8万 km^2 ,化探测试数据样本共计661个。前文已述,厄立特里亚西部和中部地区主要出露前寒武纪基底,目前发现的矿产资源主要集中在该地区。其东部主要发育中生代沉积岩、新生代火山岩和沉积岩,尤其是东南部发育大量的玄武岩及其他中基性火山岩。由于玄武岩本身的Cu元素含量较高(迟清华和鄢明才, 2007),势必会抬高Cu元素下限,影响到其他地球化学块体的圈定。因此,本文对大面积玄武岩出露区进行数据校正,根据中西部非玄武岩区的Cu元素数据为基准值,对玄武岩出露区进行Cu元素数据校正,结果见表2。

2.2 地球化学块体Cu元素异常下限及分级

通过对玄武岩区进行参数校正(金希等, 2012),得到新的Cu元素数据集。在此基础上,进行Cu元素地球化学块体的研究工作。Cu元素异常下限选取元素分布直方图中累积频率在85%处的数值,大致等于平均值加1倍的标准差。对厄立特里亚境内661个1:100万水系化学沉积物样本进行处理,得到Cu元素异常下限为 28×10^{-6} 。采用分形法处理该

套地球化学数据,得到Cu元素异常下限为 18×10^{-6} (牛旭刚等, 2023)。由于该国广泛发育中基性变火山岩,使Cu元素在此地区的丰度变高,为了更好地研究厄立特里亚Cu地球化学块体的结构和分布特征,本文以 28×10^{-6} 、 35×10^{-6} 、 44×10^{-6} 、 56×10^{-6} 、 70×10^{-6} 、 89×10^{-6} 作为分级标准(表3)。

2.3 地球化学块体的圈定

通常情况下,若研究区面积很大(如数百万 km^2),一般选取1:20万标准图幅的数据集平均值(6000~7000 km^2 内化探数据的平均值)。研究区面积相对较小时(如数十万 km^2),一般选取1:5万标准图幅的数据集平均值(约400 km^2 内元素数据的平均值)或者是1:2.5万标准图幅的数据集平均值(约100 km^2 内元素数据的平均值;刘大文, 2002)。由于厄立

表3 厄立特里亚Cu元素含量统计特征及地球化学块体含量水平分级

Table 3 Statistic characteristics of copper geochemical data and element content level classification of the geochemical blocks in Eritrea

元素	数据量	最小值	最大值	四分位值			平均值	标准差
				25%	50%	75%		
Cu	661	0.5×10^{-6}	137.4×10^{-6}	13.1×10^{-6}	19.4×10^{-6}	26.5×10^{-6}	21.6×10^{-6}	13.8×10^{-6}
元素	剔除3倍离差后		1级	2级	3级	4级	5级	6级
	平均值	标准差						
Cu	19.2×10^{-6}	8.9×10^{-6}	28×10^{-6}	35×10^{-6}	44×10^{-6}	56×10^{-6}	70×10^{-6}	89×10^{-6}

特里亚国家面积较小,而目前该国仅完成国家尺度的1:100万低密度水系沉积物地球化学测量,数据点较为分散(约100 km²一个样品),因此没有采用数据集平均值进行异常圈定,直接用每个数据点进行异常圈定。

利用Mapgis6.7软件圈定地球化学异常,依据地球化学块体理论(谢学锦等,2002),研究区内面积大于1000 km²的地球化学异常为地球化学块体,

面积在100~1000 km²之间的地球化学异常为地球化学区域异常,而对于地球化学异常面积小于100 km²和异常样本数小于2个的区域异常不参与讨论(刘彬和王学求,2018)。经过计算,共圈定出地球化学块体7个,地球化学区域异常5个(图2)。其中,地球化学块体用1、2、3等表示,地球化学区域异常常用I、II、III等表示。

根据研究区内圈定的地球化学异常分布以及

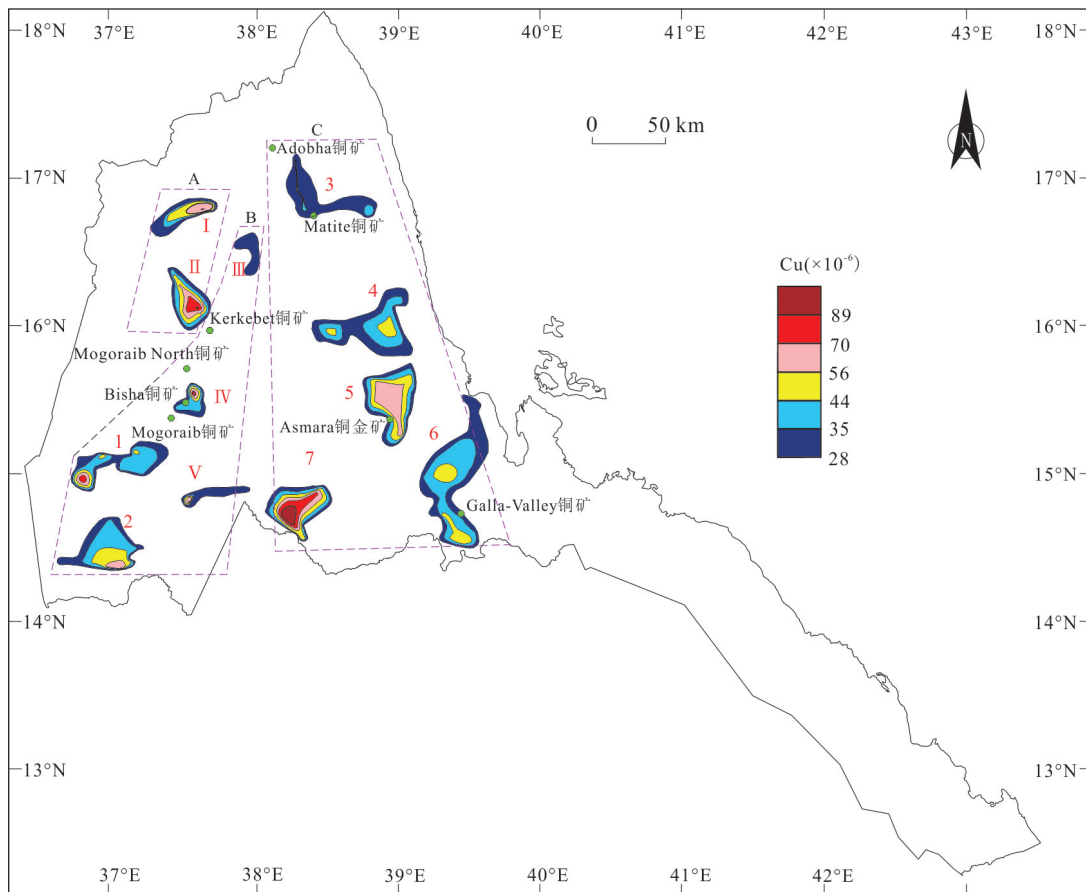


图2 厄立特里亚Cu地球化学块体及区域异常分布图

Fig. 2 Distribution of copper geochemical blocks and regional anomalies in Eritrea

区域成矿地质背景,划分出A、B、C三个区域(图2)。其中,A区主要出露新元古代Hagar群,B区隶属于碧莎铜多金属成矿带,包括1、2号地球化学块体以及III、IV、V号地球化学异常,该区主要出露新元古代Nakfa群,发育的铜矿包括VMS型矿床及少量斑岩型矿床。C区隶属于阿斯玛拉铜多金属成矿带,区内也主要出露新元古代Nakfa群,但是部分地区的元古代变火山沉积岩上部被后期的中生代玄武质熔岩覆盖,岩浆岩以新元古代同碰撞及后碰撞花岗岩为主。该区铜矿多与金矿共生,金矿多位于地表氧化带内,少量与锌矿共生。

2.4 地球化学谱系图

为表述各个块体的亲和关系,快速追索地球化学块体的元素浓集中心,依据“谱系图”建立编码系统(谢学锦等,2002)。如某个块体编号为1,分了5个级次,其中第一级编号为1,第二级则为1-1、1-2、1-3……,第三级则为11-1、11-2、12-1、13-1、13-2……,第四级则为111-1、112-1、121-1、131-1、132-1……,以此类推,建立完整编码系统。根据编码系统绘制相应的地球化学块体“谱系图”,有利于快速发现地球化学块体内部元素在各级子块体中逐步浓集的轨迹,并判断出最可能的成矿位置。

3 地球化学块体特征

3.1 总体特征

本文共圈定了7个地球化学块体和5个地球化学区域异常。地球化学块体内部结构整体较为单一,异常分级较为明显。西部碧莎铜多金属成矿带内地球化学块体(区域异常)面积较其东段阿斯玛拉铜多金属成矿带整体较小。地球化学块体(区域异常)与区域成矿区带分布十分吻合。A、B、C三个成矿区,分别对应Hagar群与基性-超基性岩相关的成矿带、碧莎铜多金属成矿带、阿斯玛拉铜多金属成矿带。地球化学块体(区域异常)整体展布方向与区域地层及控矿构造展布方向一致,其分布与已知铜矿床(点)的位置基本吻合,所有大、中型矿床及绝大部分小型矿床都落入地球化学块体(区域异常)中,已探明80%以上的铜矿资源量位于地球化学块体(区域异常)内,大型铜多金属矿床多分布在

分级数较多的地球化学块体(区域异常)内。

3.2 各个地球化学块体特征

3.2.1 A成矿区地球化学块体特征

A成矿区位于厄立特里亚西北部,发育2个大型地球化学区域异常,面积分别为677 km²和912 km²(图2)。两个地球化学区域异常均呈椭圆状,展布方向分别为北北东和北北西向。尽管展布方向有差别,但是整体为南北向,与地层的展布方向较一致。两个地球化学区域异常内部结构十分简单,具有一个浓集中心,异常等级数较高(I号具有5个异常等级,II号具有6个异常等级)。该区内以发育大片的Hagar群变基性岩-超基性岩为特征,最西部地区可见蛇绿岩套出露。初步勘探表明,该区发育大量的铜、金、镍、铬、铂族元素等矿产,具有形成与基性-超基性岩有关的铜多金属矿集区的潜力。

3.2.2 B成矿区地球化学块体特征

B成矿区位于厄立特里亚西部,隶属于碧莎成矿带,自北向南发育了2个地球化学块体和3个地球化学区域异常(图2)。2个地球化学块体和3个区域异常主体呈北北东向展布,展布方向与区内呈北北东向展布的大型韧性剪切带高度一致。除了1号地球化学块体具有3个浓集中心外,其他地球化学块体均具有一个浓集中心,它们的内部结构十分简单。3个地球化学区域异常面积较小,均小于500 km²。尽管它们面积较小,但是目前在其中或者周围均发现了铜矿,尤其是IV号区域异常,在其内部发育碧莎大型铜多金属矿。勘探资料显示,该矿床Cu资源量共80万吨,另包含大量的Zn和Au。碧莎(Bisha)铜矿并不是位于IV号异常的浓集中心,而是略有偏移(图3)。除此之外,在IV号地球化学区域异常周围发育许多矿床(点),如Mogoraib North铜矿、Hurum铜矿、Mogoraib铜矿等。这可能与采样比例尺过小有关。总体上,该地球化学区域异常具有较好的指示意义。1和2号地球化学块体分布面积较广,异常等级相对较高,展布方向与区域地层、构造的展布方向一致,其结构较B成矿区的地球化学区域异常更复杂。

3.2.3 C成矿区地球化学块体特征

C成矿区主要位于厄立特里亚中东部,与B成

矿区一致,出露大量的Nakfa群,部分地区发育中生代玄武岩。该区内发育著名的阿斯玛拉铜多金属成矿带。C成矿区内共发育5个地球化学块体(图2)。与B成矿区相比,C成矿区的各个地球化学块体面积较大,内部结构较为复杂,异常等级各不相同,最北部的3号块体有2个异常等级,南部的7号块体有6个异常等级,浓集中心非常明显。区内发育的矿床均位于各个块体内部,整体套性和性较好。其中,5号地球化学块体地处阿斯马拉-纳克法铜金多金属成矿带,区内地层及矿床的展布主要受到NNW-SSE左旋的走滑剪切带控制,发育一套新元古代变火山岩和变沉积岩系列,局部地区出露少量花岗岩类。阿斯马拉(Asmara)超大型铜多金属矿床主要赋存于该套变火山岩中,还发现了与花岗岩

有关的斑岩型铜多金属矿床(如Daero Paulos矿床)。从成矿地质条件来看,5号地球化学块体在C成矿区最具潜力。而6号地球化学块体(图4)同样隶属阿斯马拉-纳克法铜金多金属成矿带,块体内主要发育一套新元古代变质火山岩、火山碎屑岩和变质沉积岩,成矿地质条件与5号地球化学块体相似,目前在套变火山岩地层中也发现了Galla-Valley、Barazio、Berakit等铜多金属矿床。因此,6号地球化学块体的铜矿找矿潜力也不容忽视。各个地球化学块体内,矿床不在其浓集中心,可能与采样密度过稀有关。各个地球化学块体的展布方向均与区内发育的大型韧性剪切带构造方向一致(图1、图2),说明大型韧性剪切带对矿床空间展布具有一定的控制作用。

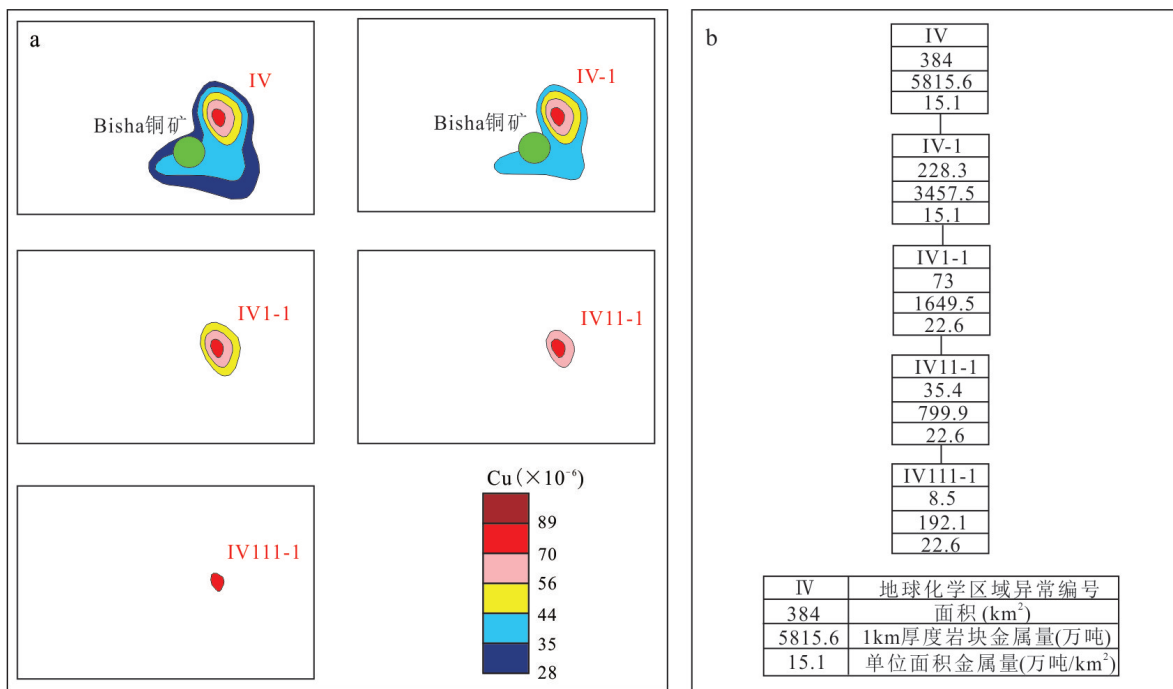


图3 厄立特里亚 IV 号 Cu 地球化学区域异常内部结构图(a)及谱系图(b)

Fig. 3 Internal structure (a) and dendritic diagram (b) of No. IV copper regional geochemical anomaly in Eritrea

4 铜资源潜力预测

4.1 地球化学块体和区域异常的参数特征

通过公式 $T = S \times \rho \times C_{bt} \times L$ (刘大文, 2002; 谢学锦等, 2002) 求得厄立特里亚境内各个地球化学块体和

地球化学区域异常的金属供应量,其中 S 为异常面积, ρ 为密度, C_{bt} 代表块体内元素的平均含量; L 代表深度。本次研究 ρ 取 $2.69 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (低级变质火山岩)。谢学锦等(2002)定义的地球化学块体深度通常为 1 km, 本文亦采用此深度。各个地球化学块体和地球化学区域异常的参数特征见表4和表5。

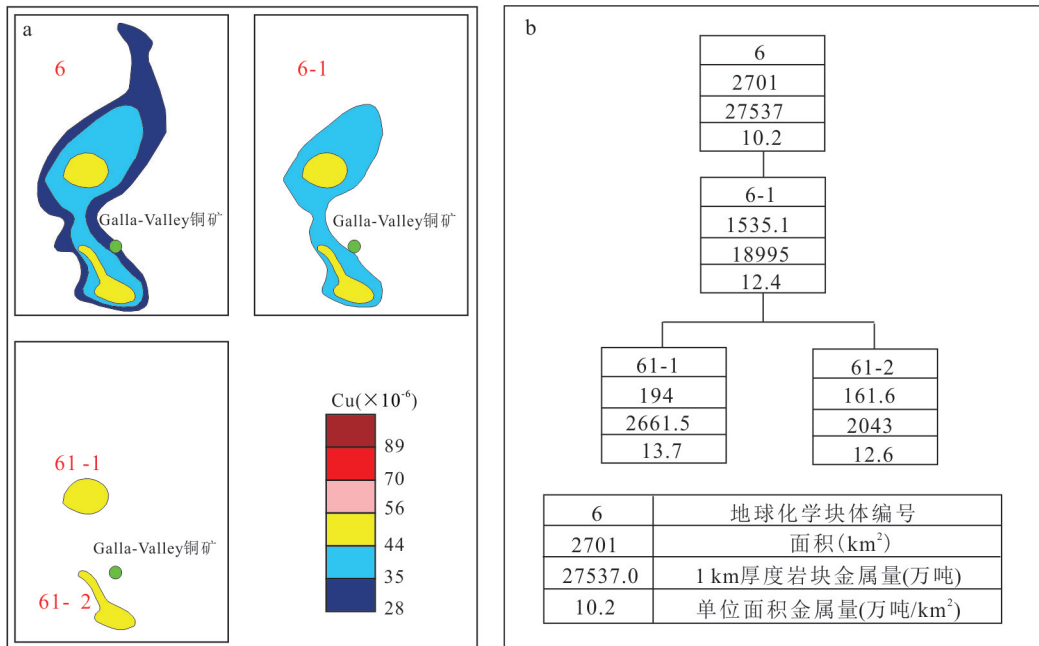


图4 厄立特里亚6号Cu地球化学块体内部结构图(a)及谱系图(b)

Fig. 4 Internal structure (a) and dendritic diagram (b) of No. 6 copper geochemical block in Eritrea

表4 厄立特里亚铜地球化学块体的数据统计特征

Table 4 Statistic characteristic of copper geochemical blocks in Eritrea

编号	面积(km ²)	最大值($\times 10^6$)	最小值($\times 10^6$)	平均值($\times 10^6$)	Cu供应量(万吨)
1	1230	89	28	45.1	14922.2
2	1358	71	29	42.0	15342.7
3	1111	41	30	35.2	10519.8
4	1886	52	30	38.3	19430.9
5	1551	63	29	54.7	22821.9
6	2701	52	29	37.9	27536.9
7	1744	137	47	74.5	34950.7

表5 厄立特里亚铜地球化学区域异常的数据统计特征

Table 5 Statistic characteristic of copper regional geochemical anomalies in Eritrea

编号	面积(km ²)	最大值($\times 10^6$)	最小值($\times 10^6$)	平均值($\times 10^6$)	Cu供应量(万吨)
I	677	72	28	43.0	7830.9
II	876	93	44	71.0	16730.7
III	307	34	28	31.2	2576.6
IV	384	84	42	56.3	5815.6
V	332	71	31	41.8	3733.1

4.2 成矿率的确定

成矿率指某个地球化学块体内当前形成的有用矿产资源总量占该地球化学块体内可供应的总金属总量的百分比。因此,在计算成矿率时,通常选

用勘探研究程度较高的地球化学块体内查明资源量与可供应金属量的比值。其公式为: $MC=R/ME$ (R 表示某地球化学块体内已查明的资源量, ME 为该地球化学块体内该金属的总金属供应量(谢学锦

等, 2002)。

虽然研究区处于阿拉伯-努比亚地盾内, 但不同成矿区的地质背景有所差别, 因此, 针对不同地质背景区域, 采用不同的矿产资源量来计算。A成矿区主要发育新元古代Hagar群, 虽然目前已有的资料显示该区内发育大量的铜矿(化点), 但是缺乏进一步的勘探工作, 故在此不讨论。B成矿区内主要发育新元古代变质火山-沉积岩, 隶属碧莎铜多金属成矿

带。区内发育碧莎大型VMS型铜多金属矿床, 目前勘探程度极高, 因此采用其目前探明的资源量(约80万吨)来计算B成矿区的成矿率, $MC=R/ME=80/5815.6=1.38\%$ 。C成矿区隶属阿斯玛拉铜多金属成矿带, 各个地球化学块体的地质背景相似, 区内发育阿斯玛拉大型VMS型铜多金属矿床, 目前控制的资源量为69万吨, 其成矿率为0.30%。在此基础上, 推测各个块体中可能的铜资源量(表6)。

表6 厄立特里亚Cu地球化学块体及地球化学区域异常内Cu资源潜力估算

Table 6 Estimated potential gold resources of copper geochemical blocks and regional geochemical anomalies in Eritrea

成矿区	编号	面积 (km ²)	矿床	Cu供应量 (万吨)	探明Cu资源量 (万吨)	成矿率 (%)	预测Cu资源量 (万吨)
A	I	677	--	7830.9	--	--	--
	II	876	--	16730.7	--	--	--
B	1	1230	--	14922.2		1.38	205.93
	2	1358	--	15342.7		1.38	211.73
	III	307	--	2576.6		1.38	35.56
	IV	384	Bisha 铜矿 ⁺	5815.6	80	1.38	80.26
	V	332	--	3733.1		1.38	51.52
	小计	4942	--	42390.1		1.38	584.98
C	3	1111	Matite 铜矿 ⁺	10519.8		0.30	31.56
	4	1886	--	19430.9		0.30	58.29
	5	1551	Asmara 铜矿 ⁺	22821.9	45.9	0.30	68.47
	6	2701	Galla-Valley 铜矿 ⁺	27537.0		0.30	82.61
	7	1744	--	34950.6		0.30	104.85
	小计	8993		115260.2		0.30	345.78
	合计	13935		18211.9			930.76

注: 预测深度按照1 km计算。

4.3 铜资源潜力

4.3.1 A成矿区铜资源潜力

前已述及, A成矿区以发育大片的Hagar群变质基性岩-超基性岩为特征, 主要为大洋增生物质, 西部地区可见蛇绿岩套出露, 这表明该区具有形成与基性-超基性岩有关的矿床潜力, 该区已发现与基性-超基性岩有关的铜、金、镍、铬、铂族元素等矿(化)点。根据圈定的地球化学异常, 利用地球化学块体理论建立块体内部结构系列, 形成套合的地球化学模式, 追溯成矿元素逐步浓集部位, 进而圈定出最有远景的成矿有利地段(I号和II号地球化学区域异常)。下一步工作应注意在I号和II号地球化

学区域异常及其周围寻找与基性-超基性岩有关的铜矿床。

4.3.2 B成矿区铜资源潜力

B成矿区主体位于阿拉伯-努比亚地盾厄立特里亚Nakfa地体内, 主要发育一套钙碱性火山岩、变沉积岩和碳酸盐岩等, 代表了一个残余岛弧及弧后盆地沉积建造。区内发育著名的碧莎铜多金属成矿带, 包括碧莎VMS型铜多金属矿床、Anagulu斑岩型铜金矿床等。铜多金属矿成矿作用主要与新元古代浅变质中基性火山岩、火山碎屑岩及相关的酸性岩浆活动密切相关。区内构造活动频繁, 断层、褶皱等广泛发育(如Elababu剪切带), 为铜矿的运移、

就位提供了重要的导矿、容矿空间。局部发育的新元古代同碰撞和后碰撞花岗岩类显示岩浆活动具有多期次、多阶段特征。这种多次岩浆活动及分异演化特性,有利于矿质的活化、迁移和富集。因此,良好的成矿地质背景显示该区具有形成大型斑岩型、VMS型及矽卡岩型铜多金属矿床的潜力和优势。结合区域地质背景,根据地球化学块体法公式,求得该区Cu的总金属供应量可达42390.1万吨,按照成矿率1.38%估算,预测该区内总的Cu资源量达584.98万吨(表6)。尤其是1号和2号地球化学块体,两者均具有形成百万吨铜矿的潜力,下一步工作中值得重视。

4.3.3 C成矿区铜资源潜力

C成矿区主体位于阿拉伯-努比亚地盾厄立特里亚 Nakfa 地体内,该区的岩浆岩具有残存大洋岛弧特征(Teklay et al., 2002),发育大量的花岗岩等侵入岩。区内主要地球化学块体与 Asmara 成矿带相吻合,受平行分布的北西向构造带控制,主要矿床类型包括 VMS 型(如 Asmara、Matite、Galla-Vally 等)、斑岩型(如 Daero Paulos)铜多金属矿床。虽然矿床分布没有位于各个子块体的异常浓集中心,但是整体位于较高的异常位置处,与异常的套合度较好,显示了地球化学块体法在找矿预测方面具有良好的指示意义。

根据地球化学块体法公式,求得该区Cu的总金属供应量可达115260万吨,按成矿率0.30%估算,该块体内总的Cu资源量达345.78万吨(表6)。目前,该块体内部仅仅控制了阿斯玛拉矿床铜的资源量,为45.9万吨。该区块具有良好的找矿前景,尤其是异常峰值高、面积大的4、6、7号地球化学块体。

尽管同属于 Nakfa 地体, C 成矿区异常面积和总金属供应量均大于 B 成矿区,但是 C 成矿区的铜矿床数目、成矿率以及预测资源潜力均小于 B 成矿区。这可能有以下两个原因:(1)岩石特征方面,由于 C 成矿区靠近东部,大面积的中生代及新生代火山岩发育,在 C 成矿区上部残存中-新生代火山岩,主要为具较高 Cu 含量的玄武岩。因此, C 成矿区圈定的异常面积较 B 成矿区更大,对应的总金属量更大;(2)构造环境方面, B 成矿区内的新元古代变火

山沉积岩代表了残余岛弧及弧后盆地沉积建造,岩浆活动及相应的 VMS 型矿床形成于俯冲作用引起的弧后拉张环境(Teklay et al., 2003; 赵凯等, 2018),而其东部包括 C 成矿区的花岗岩具有大洋岛弧特征(Teklay et al., 2002),两者可能代表了阿拉伯-努比亚地盾南缘一套完整的与 NW 方向俯冲相关的岛弧-弧后系统(Teklay et al., 2006),弧后拉张环境下更有利于 VMS 型铜多金属矿床的产出(Li Z G et al., 2016)。B 成矿区尽管异常峰值较低,异常面积较小,但发育更多且资源量更大的 VMS 型铜矿床。

5 结论

(1)以 Cu 元素的异常下限为 28×10^{-6} ,以 28×10^{-6} 、 35×10^{-6} 、 44×10^{-6} 、 56×10^{-6} 、 70×10^{-6} 、 89×10^{-6} 作为分级间隔,厄立特里亚境内共圈定出地球化学块体 7 个,地球化学区域异常 5 个。各地球化学块体内部结构整体较为单一,异常分级较为明显;地球化学块体(区域异常)与区域上发育的成矿区带分布十分吻合,大部分矿床都落入了地球化学块体(区域异常)内,套和性较好。

(2)根据厄立特里亚境内地球化学异常和成矿地质背景,划分出 A、B、C 三个成矿区。计算得出 B 成矿区 Cu 金属供应量为 42390 万吨,预测 Cu 资源量为 584.98 万吨; C 成矿区 Cu 金属供应量达 115260 万吨,预测 Cu 资源量为 345.78 万吨。预测厄立特里亚潜在铜资源达 930.76 万吨。

(3)B 成矿区相对于 C 成矿区更有利于形成 VMS 型铜多金属矿床。5、6 号铜地球化学块体可作为铜矿勘查的重点区域,1、2、3、4、7 号铜地球化学块体的找矿潜力也值得注意。

参考文献:

- 迟清华,鄯明才.2007.应用地球化学元素丰度数据手册[M].北京:地质出版社.
- 姜军胜,胡鹏,向文师,王建雄,雷义均,赵凯,曾国平,吴发富,向鹏.2021.埃塞俄比亚西部布雷地区类埃达克岩年代学、地球化学及对区域构造演化的指示[J].地质学报,95(4):1260-1272.

- 金希,杨功,肖高强,龚鹏,熊燃,赵波.2012.地球化学块体法在滇中层控型铜矿资源评价中的应用[J].地质科技情报,31(4):33-39.
- 李堃,刘凯,汤朝阳,段其发.2013.湘西黔东地区Zn地球化学块体特征及锌资源潜力估算[J].中国地质,40(4):1270-1277.
- 刘彬,王学求.2018.长江中下游地区铜地球化学块体物质来源及其对铜矿集区形成的制约[J].矿物岩石地球化学通报,37(2):271-282.
- 刘大文,谢学锦,严光生,连长云,王全明.2002.地球化学块体的方法技术在山东金资源潜力预测中的应用[J].地球学报,23(2):169-174.
- 刘大文.2002.地球化学块体的概念及其研究意义[J].地球化学,31(6):539-548.
- 牛旭刚,周宏,张文纲,牛永杰,郭东宝,丁国林,王茂.2023.S-A多重分形法在地球化学异常圈定中的对比应用—以甘肃文康地区为例[J].地质与勘探,59(4):817-827.
- 王学求,申伍军,张必敏,聂兰仕,迟清华,徐善法.2007.地球化学块体与大型矿集区的关系—以东天山为例[J].地学前缘,(5):116-123.
- 王学求.2013.勘查地球化学近十年进展[J].矿物岩石地球化学通报,32(2):190-197.
- 向文帅,姜军胜,雷义均,赵凯.2020.埃塞俄比亚西部布雷地区A型花岗岩成因及地质意义[J].地球科学,46(7):2299-2310.
- 向文帅,姜军胜,赵凯.2019.应用地球化学块体法评价厄立特里亚金矿资源潜力[J].中国矿业,28(12):176-182.
- 谢学锦,邵跃,王学求.1999.走向21世纪矿产勘查地球化学[M].北京:地质出版社.
- 谢学锦,刘大文,向运川,严光生.2002.地球化学块体—概念和方法学的发展[J].中国地质,29(3):225-233.
- 赵凯,姚华舟,王建雄,Ghebsha Fitwi Ghebretnsae,向文帅,杨镇.2018.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,45(1):156-167.
- 赵忠孝,段焕春,王凤仙.2012.厄立特里亚地质矿产概况及勘查新进展[J].矿产勘查,3(5):707-714.
- Andersson U B, Ghebreab W, Teklay M. 2006. Crustal evolution and metamorphism in east-central Eritrea, south-east Arabian-Nubian Shield[J]. Journal of African Earth Sciences, 44:45-65.
- Barrie C T, Abdalla M A F, Hamer R D. 2016. Volcanogenic Massive Sulphide-Oxide Gold Deposits of the Nubian Shield in Northeast Africa[J]. Mineral Deposits of North Africa,5(17):417-435.
- De Souza Filho C R, Drury S A. 1998. A Neoproterozoic supra-subduction terrane in northern Eritrea, NE Africa[J]. Journal of the Geological Society, 155(3): 551-566.
- Ghebreab W, Greiling R O, Solomon S. 2009. Structural setting of Neoproterozoic mineralization, Asmara district, Eritrea[J]. Journal of African Earth Sciences, 55(5): 219-235.
- Hood S B, Cracknell M J, Gazley M F, Reading A M. 2019. Improved supervised classification of bedrock in areas of transported overburden: Applying domain expertise at Kerkasha, Eritrea[J]. Applied Computing and Geosciences, 3-4: 100001.
- Johnson P R, Andresen A, Collins A S, Fowler A R, Fritz H, Ghebreab W, Kusky T, Stern R J. 2011. 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, 61(3): 167-232.
- Johnson P R, Zoheir B A, Ghebreab W, Stern R J, Barrie C T, Hamer R D. 2017. Gold-bearing volcanogenic massive sulfides and orogenic-gold deposits in the Nubian Shield[J]. South African Journal of Geology, 120: 63-76.
- Li Z G, Chu F Y, Dong Y H, Li X H, Liu J Q, Yang K H, Tang L M. 2016. Origin of selective enrichment of Cu and Au in sulfide deposits formed at immature back-arc ridges: examples from the Lau and Manus Basins[J]. Ore Geology Reviews, 74: 52-62.
- Perello J, Richard H S, Humberto B, Alfredo G. 2020. Metallogenic inception of the Arabian-Nubian Shield: Daero Paulos porphyry copper prospect, Eritrea[J]. Gondwana research, 88(1): 106-125.
- Stern R J, Johnson P. 2010. Continental lithosphere of the Arabian plate: a geologic, petrologic, and geophysical synthesis[J]. Earth-Science Reviews, 101(1-2):29-67.
- Stern R J, Johnson, P R. 2019. Constraining the Opening of the Red Sea: Evidence from the Neoproterozoic margins and Cenozoic magmatism for a volcanic rifted margin. In: Rasul N M A, Stewart I C F. Geological Setting, Palaeoenvironment and Archaeology of the Red Sea[M]. Springer International Publishing: 53-79.
- Stern R J. 1994. Arc assembly and continental collision in the Neoproterozoic East African Orogen: implications for

- the consolidation of Gondwanaland[J]. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 22: 319-351.
- Teklay M, Haile T, Kröner A, Asmerom Y, Watson J. 2003. A back-arc palaeotectonic setting for the Augaro Neoproterozoic magmatic rocks of western Eritrea[J]. *Gondwana Research*, 6:629-640.
- Teklay M, Kröner A, Mezger K. 2001. Geochemistry, geochronology and isotope geology of Nakfa intrusive rocks, northern Eritrea: products of a tectonically thickened Neoproterozoic crust[J]. *Journal African Earth Sciences*, 33:283-301.
- Teklay M, Kröner A, Mezger K. 2002. Enrichment from Plume Interaction in the Generation of Neoproterozoic Arc Rocks in Northern Eritrea: Implications for Crustal Accretion in the Southern Arabian-Nubian Shield[J]. *Chemical Geology*, 184(1-2): 167-84.
- Teklay M. 2006. Neoproterozoic arc-back-arc system analog to modern arc-back-arc systems: evidence from tholeiite-boninite association, serpentinite mudflows and across-arc geochemical trends in Eritrea, southern Arabian-Nubian shield[J]. *Precambrian Research*, 145(1): 81-92.
- Teklay M. 1997. Petrology, geochemistry and geochronology of Neoproterozoic magmatic arc rocks from Eritrea: implications for crustal evolution in the southern Nubian Shield[M]. *Memoir 1, Department of Mines, Asmara*: 125.