

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.010

东北非 VMS 矿床地质特征与研究进展

向文帅^{1,2}, 赵凯^{2*}, 曾国平², 李福林², 王建雄², 胡鹏², 张紫程³

XIANG Wenshuai^{1,2}, ZHAO Kai^{2*}, ZENG Guoping², LI Fulin², WANG Jianxiong², HU Peng², ZHANG Zicheng³

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205;

3. 中国地质矿业有限公司, 北京 100029

1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China;

3. China Geological Mining Company Ltd., Beijing 100029, China

摘要:东北非地区主要包括埃及、苏丹、厄立特里亚和埃塞俄比亚。该地区金、银、铜、锌等矿产资源丰富,主要矿床类型为 VMS(火山成因块状硫化物)矿床。自发现 Ariab、Bisha 等大型 VMS 矿床以来,各国矿业公司在东北非地区开展勘探和开发,并新发现大量矿床,铜、金等矿产资源量不断增加。通过对区域内各国 VMS 矿床的勘查、研究进展进行梳理和总结,以期为本地区开展矿产勘查和投资开发的企业提供参考。区内 VMS 矿床围岩多为双峰式偏长英质火山岩,与火山弧岩石组合有一定相关性,主要控矿因素为剪切带、褶皱和具有一定特征的变质火山沉积岩系,矿床形成集中于 3 个阶段,时间跨度为 890 ~ 695 Ma,矿床形成于两类古构造环境,即洋内汇聚板块边缘的岛弧环境和弧后盆地环境。许多矿床都经历了近地表氧化和表生富集作用,金和铜在浅层相对富集。已发现的矿床主要位于东北非努比亚地盾偏中北部地区,集中于 Barka、Gabgaba、Eastern Desert 地体,找矿有利区位于 Barka、Nakasib、Kerak、Nugrus 缝合带附近。

关键词:VMS 矿床;东北非;努比亚地盾;成矿规律;矿产勘查工程

中图分类号:P618.4;P618.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)01-0129-12

Xiang W S, Zhao K, Zeng G P, Li F L, Wang J X, Hu P, Zhang Z C. Geology of VMS deposits in Northeast Africa and their research progress. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 129-140

Abstract: The Northeast Africa mainly includes Egypt, Sudan, Eritrea and Ethiopia, hosting rich mineral resources such as gold, silver, copper and zinc, and the main types of mineral deposits are VMS. Since the discovery of large VMS deposits such as Ariab and Bisha, mining companies from various countries have been conducting exploration and mining in this region, and the discovery of a large number of new deposits elevate the mineral resources of copper and gold. The summary of exploration and research progress of VMS deposits in those countries can provide references for enterprises that carry out mineral exploration and investment in this region. The host rocks of VMS deposits in this region are mainly bimodal felsic volcanic rocks, which indicate a certain correlation with the volcanic arc rock combination, and the main controlling factors for the deposits are shear zones, folds and characteristic metamorphosed volcanic-sedimentary series. The ages of these deposits are mainly concentrated in three stages ranging from 890 Ma to 695 Ma, and were formed in two types of paleotectonic environments, island arc on the margins of convergent plates and back-arc basin in the oceans. Most deposits experienced near-surface oxidation and supergene enrichment, with gold and copper relatively enriched near surface. The discovered VMS deposits are mainly distributed in the north-central part of the Arabian Nubian Shield, including Barka, Gabgaba,

收稿日期:2021-01-11;修订日期:2021-11-19

资助项目:中国地质调查局项目《北部非洲大型铜金资源基地评价》(编号:DD20190443)

作者简介:向文帅(1986-),男,在读博士生,高级工程师,从事境外地质矿产调查与研究工作。E-mail:xiangwenshuai@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者:赵凯(1987-),男,博士,从事地质矿产及研究工作。E-mail:286877542@qq.com

Eastern Desert terranes, and the prospects are near the Barka, Nakasib, Keraf, and Nugrus suture zones.

Key words: VMS deposits; Northeast Africa; Nubian shield; metallogeny; mineral exploration engineering

东北非地区具有丰富的金、银、铜、锌等矿产资源,主要矿床类型之一为火山成因块状硫化物矿床(VMS 矿床)^[1]。VMS 矿床是在世界各地广泛分布的一种重要矿床成因类型,主要形成于伸展的海底火山环境,广布于各大造山带^[2-3]。据统计,世界上 VMS 矿床总数超过 800 个^[4],22% 的锌、6% 的铜、9.7% 的铅、8.7% 的银和 2.2% 的金产自 VMS 型矿床^[3]。东北非地区的 VMS 矿床具有一些独特的特征,如相对富金、普遍具有表生氧化富集等,局部后期叠加造山型金矿,具有较高的经济价值^[1]。自发现 Ariab、Bisha、Asmara 等大型 VMS 矿床以来,各国矿企在厄立特里亚、埃塞俄比亚、苏丹、埃及的勘探和开发投入不断增加,并发现了大量新矿床^[5-6],具有成为大型铜金资源基地的潜力。前人研究多集中于某个具体矿床,对区域内矿床特征、分布规律等研究较少,本文聚焦东北非 VMS 型矿床的勘查与研究进展,对东北非 VMS 矿床的特征和分布规律及找矿标志进行了梳理和总结,以期在本地区开展矿产勘查和投资开发的企业提供参考。

1 区域地质背景

东北非地区自新元古代东、西冈瓦那大陆拼合以来,直至早中新世红海张开,其变质基底称为努比亚地盾^[7],大地构造上位于东非造山带北部,出露的主要岩石为新元古代变质岩系^[8]。努比亚地盾北半部分主要由角闪岩相-麻粒岩相的基性-酸性片麻岩、中低级变质火山-沉积岩及各类侵入岩组成,铅和钽同位素研究表明,大部分新元古代岩石直接由地幔熔体分异形成,而不是通过老地壳改造而来^[8],仅在局部区域,如埃及和苏丹西部地区源自古元古代或中元古代下地壳^[9]。在南部(埃塞俄比亚南部)开展的同位素年代学研究表明,大部分地壳不同于西侧新太古代—中元古代的坦桑尼亚-刚果克拉通岩石,年龄较新^[10-11]。努比亚地盾的地层记录了罗迪尼亚超大陆的裂解,在 800~650 Ma 随着莫桑比克洋闭合,大量岛弧合并,最终形成冈瓦纳大陆^[8]。

东北非地区在东、西冈瓦纳大陆碰撞过程中,由洋内岛弧、弧后盆地及微大陆缝合形成了南北向

和东西向增生造山带^[11-12],不同地体之间的缝合带包括弧-弧缝合带及弧-陆缝合带^[13]。其中,从厄立特里亚至埃塞俄比亚西部,出露南北向的 Baraka-Tulu Dimtu 弧-弧缝合带(图 1),该缝合带向南延伸到埃塞俄比亚 Gore-Gambella 变形带。Barka 缝合带发育蛇绿岩和火山沉积系列,且被左行构造挤压变形,是弧后盆地消减后,两侧岩层斜向碰撞的产物^[14]。苏丹地区发育东西向压缩和南北向拉伸带,出露 Oko 和 Hamisana 剪切带及 Keraf 缝合带^[1]。埃及东部沙漠地块主要经历了剪切作用和北西方向的逆冲、伸展和构造逃逸,局部以北西向构造为主导^[15]。

Kusky 等^[16]对本地区新元古代的岩浆活动进行了总结,将其划分出 3 个明显的演化期:①泛非地幔柱的隆起,导致富集地幔柱、海底高原及富集洋壳的形成,这一时期持续时间很短,少于 20 Ma。②岛弧环境中的钙碱性岩浆活动,岛弧活动持续了 200 Ma,随后,铁镁质地壳及岩石圈地幔成为钙碱性花岗岩基、碱性花岗岩和显生宙钙质玄武岩的源区。③熔融的铁镁质地壳及岩石圈地幔形成花岗质岩浆岩和碱性玄武岩。3 个演化期分别发生了岩石圈地幔及地壳循环、裂开、抬升和侵蚀,被认为代表了一个完整的地幔循环周期,即威尔逊旋回^[8]。

东北非地区的地层主要由 3 个部分组成:下部的前寒武系基底岩石,其上不整合覆盖中生界沉积岩和古近系—第四系火山岩和沉积岩。常以剪切带和断裂带圈定的区域进行地体划分^[17]。整个阿拉伯-努比亚地盾已识别出大量缝合带和 20 多个地体(图 1)。努比亚地盾北部的主要火山岩年龄范围在 750~695 Ma 之间,中部的火山弧岩石年龄范围为 830~720 Ma,南部的主要岩浆岩年龄为 870~690 Ma。

埃及东部沙漠地体(Eastern Desert)的基底岩石主要由一系列变质火山岩组成,包括蛇绿岩套、绿片岩相-角闪岩相变质玄武岩、安山岩、凝灰岩和部分条带状铁建造^[18]。苏丹杰卜杰拜地体(Gabgaba)和杰比特地体(Gebeit)主要由变质火山沉积岩组合构成。Barka 地体位于埃塞俄比亚北部和厄立特里亚,主要岩性包括拉斑-钙碱性玄武岩、安山岩、榴

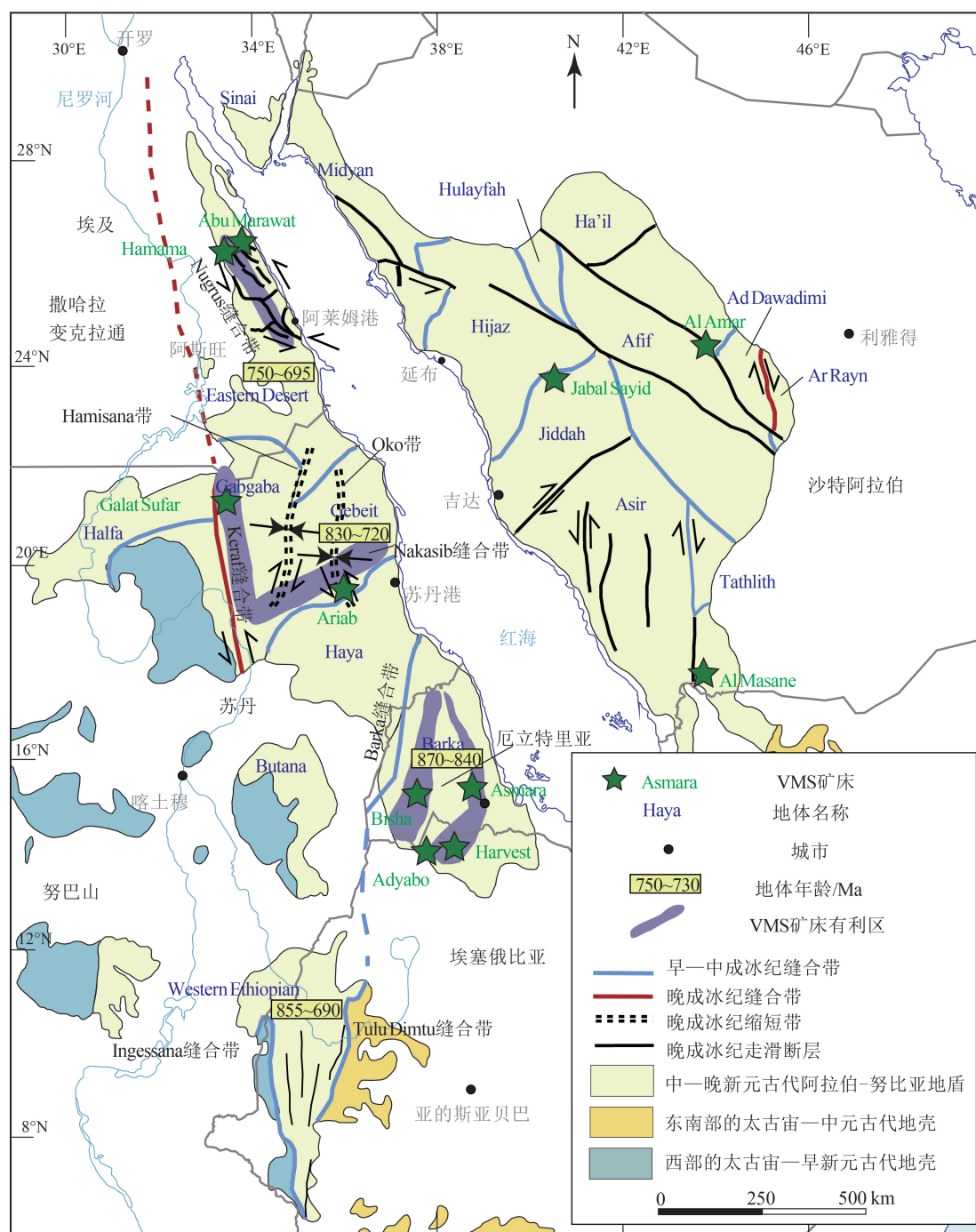


图 1 东北非地区主要地体与缝合带及 VMS 矿床分布图(据参考文献[10]修改)

Fig. 1 Main terranes, suture zones and VMS deposits in Northeast Africa

辉岩和流纹岩,以及火山碎屑岩、变质泥岩、石墨片岩、石英岩和大理岩^[19-20],地体两侧的片麻岩相区域发育石英长石片麻岩、角闪岩、矽线石-蓝晶石片岩、被主构造期后的闪长岩、花岗岩和伟晶岩侵入^[11,21]。厄立特里亚和埃塞俄比亚北部已发现的

VMS 矿床集中发育在 2 个近南北向的绿岩带中(图 1),其中西部的 Bisha-Augaro-Adobha 带以 Bisha 矿床为中心^[5];东侧的阿斯马拉-纳克法带以 Asmara 矿床为中心,2 条带上还发现了大量造山型金矿^[22]。埃塞俄比亚西部地体(Western Ethiopian)和埃塞俄

比亚南部地体位于努比亚地盾南部,岩石组合为绿片岩及片麻岩和片岩。埃塞俄比亚南部地体的锆石 U-Pb 同位素年龄为 890~840 Ma^[21],埃塞俄比亚西部地体的全岩 Rb-Sr 同位素年龄为 855~690 Ma^[20, 23]。

2 典型矿床地质特征

东北非地区发育一系列 VMS 矿床和造山型金矿,是全球各矿业公司关注的重要铜金资源远景区。目前有来自中国、加拿大、澳大利亚、英国、阿联酋等多国的 20 多家公司在区域内进行勘查开发,主要 VMS 矿床信息见表 1。

厄立特里亚最大的 VMS 矿床为紫金矿业控股的 Bisha 矿床,于 2013 年开始生产;另一个大型 VMS 矿床为四川路桥矿业公司的 Asmara 矿床,于 2015 年获得采矿许可,正进行矿山建设。埃塞俄比亚 VMS 矿床包括 Harvest 和 Adyabo 矿床,分别由紫金矿业和西藏华钰集团控股,均于 2019 年获得采矿许可。苏丹最大的 VMS 矿床为 Ariab,位于 Nakasib 缝合带附近,由法国 Ariab 矿业公司与苏丹政府合资开发,于 1991 年开始生产;苏丹北部 Galat Sufar 矿床为 VMS 与造山型复合矿床,位于 Keraf 缝合带附近的 14 区块,由加拿大 Orca Gold 公司进行勘查

和开发。埃及的 Abu Marawat 和 Hamama 两个 VMS 矿床由加拿大 Aton Resources 公司进行勘查与开发(表 1)。依据已发现的变质火山岩、缝合带等特征,沿 Keraf 缝合带、Nakasib 缝合带^[24]、Bisha-Augaro-Adobha 带、Asmara-Nakfa 带^[25],以及埃及东部沙漠 Nurgus 缝合带附近具有进一步寻找 VMS 矿床的潜力,众多矿业公司正在这些地区进行勘查。

尽管 VMS 矿床有几种不同的类型,但大多数矿床的围岩都是双峰式偏长英质或双峰式硅质碎屑岩,并含重晶石^[26]。由于处于周期性干旱或热带环境,许多火山成因块状硫化物矿床都经历了近地表氧化和表生富集作用,金和铜相对富集在浅层,因此从经济角度而言,这些矿床易于勘查和开发,目前东北非 4 国主要的 VMS 矿床分布见图 1。

在新元古代晚期,伴随莫桑比克洋的形成与消减汇聚,在东北非地区形成俯冲相关的岛弧-弧后环境,并在岛弧及弧后盆地环境中形成了锌-铜-金型和锌-铅-铜-金型 VMS 矿床。研究表明,Bisha、Ariab 等矿床与“黑矿”型 VMS 矿床特征相似,Asmara、Harvest 等矿床与“诺兰达型”VMS 矿床特征相似。

(1) Asmara 锌-铜-金矿床

厄立特里亚的 Asmara 矿床作为典型的锌-铜-金型矿,位于厄立特里亚首都附近,属于 Asmara-Nakfa 成矿带。该矿床最早于 1938 年由意大利 MEASIA 公司进行勘探,随后埃塞俄比亚、(前)南斯拉夫、日本等国家的多家公司连续对该矿床进行勘查,并建成一个竖井,开采了近 4900×10^4 t 矿石。1991 年厄立特里亚独立后,与邻国战争致矿业开发停滞。2015 年,加拿大 Sunridge 公司获得采矿权证,2016 年四川路桥矿业公司收购该项目,预计将于近期开始矿山建设。截至 2018 年底,该矿床资源量为:金 42 t(0.47 g/t),铜 69×10^4 t(0.75%),锌 112×10^4 t(1.22%),银 899 t(10.11 g/t)。矿山设计服务年限为 16 年,设计矿石处理峰值为 3340×10^4 t/a^[27]。Asmara 矿床包括 5 个矿段,分别是埃博戴豪(Emba Derho)、戴博瓦(Debarwa)、阿迪拉拉斯(Adi Nefas)、柯达多(Kodadu)和阿迪拉西(Adi Rassi)(图 2)。在阿迪拉拉斯还发育谷坡(Gupo)叠加造山型金矿,主要包括近地表金-银氧化带、过渡带的贵金属水平带、表层次生的铜、锌淋滤带和原生硫化物带 4 种矿化带。在矿区内还发现了多条发

表 1 东北非主要 VMS 型矿床产量及金属资源量
Table 1 Metal output and mineral resources of major VMS deposits in Northeast Africa

矿床	控股方	矿石产量 /(10^4 t · a ⁻¹)	金属资源量			国家
			金/ t	铜/ 10^4 t	锌/ 10^4 t	
Bisha	紫金矿业	240	38.06	66.00	317.00	厄立特里亚
Asmara	四川路桥	645	42.90	69.15	112.06	
Harvest	紫金矿业	26	7.84	7.52	9.27	埃塞俄比亚
Adyabo	西藏华钰	71	8.49	2.98	—	
Ariab	Ariab Mining	198	31.00	135.35	—	苏丹
Galat Sufar	Orca Gold	570	126.04	—	—	
Hamama	Aton Resources	83	14.86	—	—	埃及
Abu Marawat	Aton Resources	—	5.08	2.23	3.34	

注:除 Bisha、Ariab 外,其他矿床为可研设计产量;资源量数据据各公司官网及标普数据库

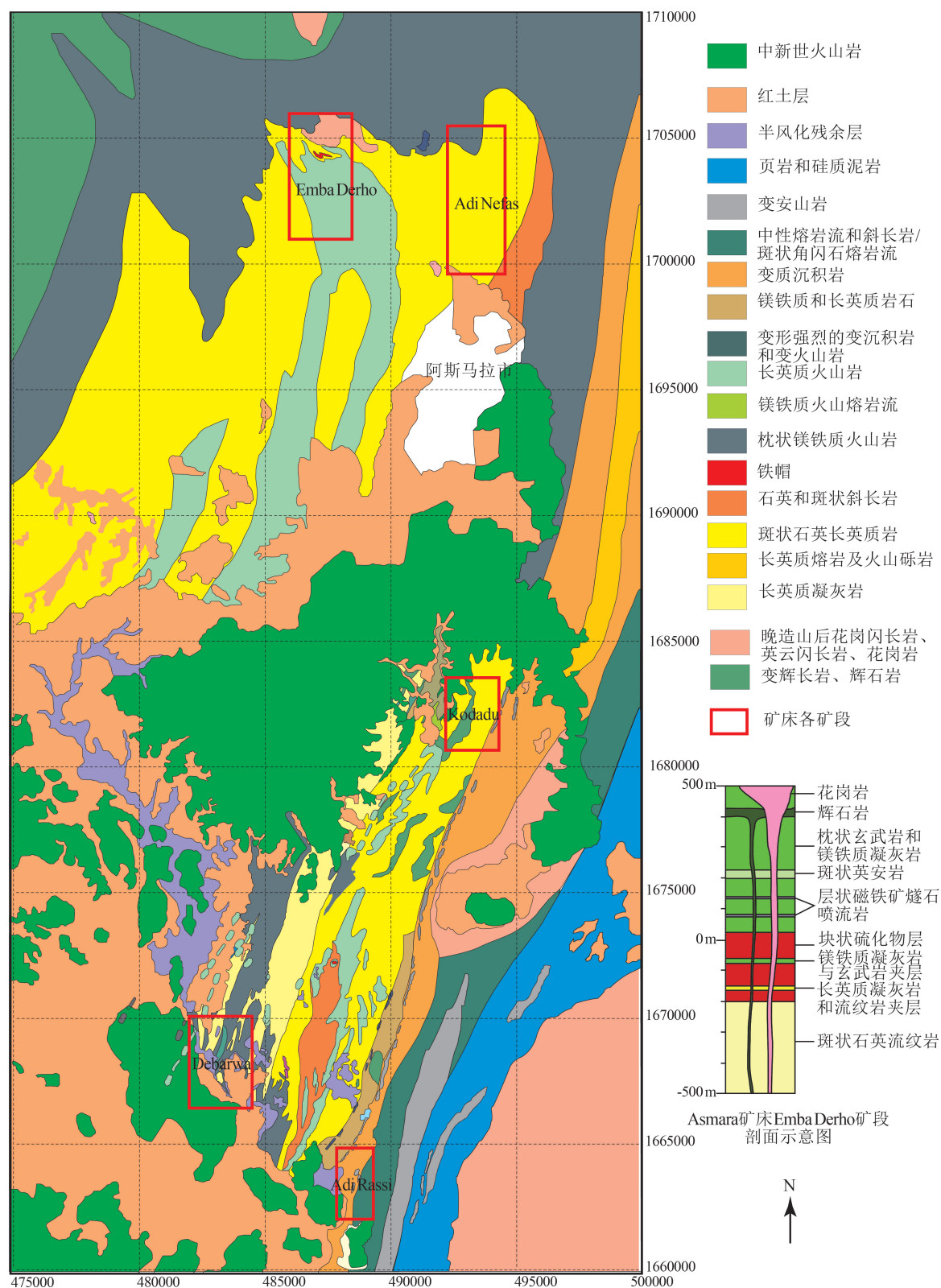


图 2 厄立特里亚 Asmara 矿床矿区地质简图(据参考文献[27]修改)

Fig. 2 Simplified geological map of Asmara mine in Eritrea

育在韧性剪切带里的石英脉型金矿体,主要为北北东向和北北西向。矿区内主要出露陡倾的层状火山岩及沉积岩序列,主要由钙碱性火山岩、火山碎屑岩及变沉积岩组成,所有岩石呈南北走向展布,局部被花岗岩侵入。金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、针铁矿、赤铁矿、辉铜矿、蓝辉铜矿等^[6]。

以 Asmara 的埃博戴豪矿体为例,其主要含矿岩系是新元古代变质双峰式火山岩,矿体赋存在北—北东走向向东陡倾的绿片岩相变质岩中,控矿构造为阿斯马拉向斜,该矿床的地表特征是明显出露的铁帽(图 3),东西长约 800 m,南北宽约 220 m。围岩蚀变主要为绢云母化、绿泥石化、硅化。矿床的原生矿石类型有 2 种,分别是黄铁矿型铜矿石和黄铁矿型锌矿石。这 2 种矿石的矿石构造均以块状为主,局部还可见浸染状构造、角砾状构造、碎裂构造等。矿石结构为粒状结构、交代结构、填隙结构、压碎结构等。矿床中闪锌矿的流体包裹体主要为两相水溶液包裹体,少量包裹体均一温度变化于 306~381℃之间,冰点为 -2.0~-0.5℃,对应盐度为 3.4%~0.9% NaCl eqv。流体包裹体拉曼特征可能反映了较高的硫酸盐含量,可能在后期的变形变质过程中包裹体与寄主矿物发生了化学反应,或溶解了寄主矿物闪锌矿的成分,使包裹体的溶液成分中含较高的硫酸盐^[28]。

(2)Harvest 铜—金—银—锌矿床与 Adyabo 金—铜—银矿床

Harvest 矿床和 Adyabo 矿床都位于埃塞俄比亚北部施瑞镇以北 25 km,该地区与厄立特里亚接壤。1971 年,Hunting 地质地球物理勘探公司在区内进行了航磁和电法勘探,发现了一些由侵入黑云母花

岗岩引起的磁异常。1994—1998 年,EZANA 公司与加纳 Ashanti Goldfields 合作,在区内开展了水系沉积物测量、小范围土壤、岩石测量等,圈定了铜金异常区,1996—2000 年通过电阻率法勘探工作,发现了一条长 4.5 km、宽 200~1250 m 的强激电异常带,钻探发现存在广泛分布的硫化物,2004 年 9 月 Fugro Airborne Surveys 进行了航空电磁法勘探。中色地科公司 2008—2012 年在区内进行了矿产地质调查和评价工作,在 Terakimti, Mato Bula 和 Da Tambuk 发现了较大规模的铜—金—银矿体^[29]。截至 2020 年,Harvest 矿床资源储量为金当量约 2.3 t,平均品位 3.1 g/t,伴生银^[30]。Adyabo 矿床资源储量为金当量约 12.4 t,品位 3~4.9 g/t,伴生银铜^[31]。Harvest 矿床和 Adyabo 矿床均属于 Asmara—Nakfa 成矿带的南延,这 2 个 VMS 矿床所在的施瑞地区主要出露新元古界变火山岩系,岩性包括基性火山岩、长英质火山碎屑岩、变流纹质凝灰岩、石英斑岩等。区内断裂以北东东向为主,矿化与次火山岩石英斑岩及断裂构造关系密切。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、碳酸盐化和绿泥石化。Harvest 矿床发育长 1200 m,宽 15~110 m 的含铁帽硫化物蚀变带,矿体主要出露在浅灰白色变流纹质凝灰岩中。矿体呈北东—南西走向,倾向南东。硫化物蚀变带附近常见酸性次火山岩及酸性斑状熔岩。次生富集带矿化主要为块状辉铜矿、黄铜矿、铜蓝和黄铁矿化,原生硫化物带矿化主要为块状浸染状黄铜矿、黄铁矿及闪锌矿。矿体间常含流纹斑岩等次火山岩^[32]。

(3)Bisha 锌—铅—铜—金矿床

厄立特里亚的 Bisha 作为典型的锌—铅—铜—金型矿床,位于厄立特里亚西部 Barka 地体,是区域内



图 3 Asmara 矿床 Emba Derho 矿区地表铁帽野外照片

Fig. 3 Outcrop of surface gossan in Emba Derho of the Asmara mine

超大型含金 VMS 矿床^[5], 属于 Augaro - Bisha - Adobha 成矿带。区域内发育一套近 3000 m 厚的凝灰岩, 以及少量流纹岩流、角砾岩、玄武岩和火山碎屑沉积岩。Bisha 矿床赋存于该岩系中—上部的长英质凝灰岩和火山角砾凝灰岩中^[5, 33]。矿床被归类为双峰式—偏酸性 VMS 矿床, 围岩年龄约为 850 Ma^[34]。块状硫化物矿体与围岩一起被褶皱于南北向直立紧闭的背斜中。东西向挤压作用使层状 VMS 矿体集中在背斜核部, 主矿体在平面上又分为东、西 2 个透镜体, 分别位于褶皱的东、西两翼, 整个矿体南北走向长约 1.2 km, 近矿围岩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。较强的风化和氧化作用使浅层的大多数硫化物遭受强烈氧化, 在地表形成 Au、Ag 等元素高度富集的氧化带(铁帽), 矿床从表层到深部的矿化特征见表 2。围岩蚀变从矿体向外依次为钾长石化、硅化、绿泥石化, 绢云母化出现在矿体以上几十米范围内。矿石主要为块状构造, 金属矿物包括细—中粒的黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿, 少量方铅矿、毒砂、黝铜矿、砷黝铜矿和硫砷铜矿^[5]。脉石矿物包括石英、绿泥石、绢云母、白云母、粘土矿物、菱铁矿和碳酸亚铁。

(4) Ariab 金矿床

Ariab 矿床位于苏丹东部, 该地区的开采始于 1991 年, 最初在氧化带中对金矿进行露天开采, 到 2012 年, 已从多个矿体的上层富金氧化层中开采了 71.5 t 金^[35], 该矿床中的大多数富金氧化带现已近采空。区域共有 13 个 VMS 矿体, 平均金品位为 1~1.5 g/t^[35-36]。氧化带中金品位可达 10 g/t。矿床块状硫化物矿物包括黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿, 以及少量磁黄铁矿、方铅矿、黝铜矿—银黝铜矿和毒砂。围岩蚀变包括硅化、绿泥石化、绢云母化和局部碳酸盐化^[35-36]。

(5) Galat Sufar 金矿床

Galat Sufar 矿床又称为 Block 14 金矿, 位于苏丹首都喀土穆以北 900 km 处。1977—2004 年, 法国地质调查局(BRGM)、德国联邦地球科学与自然资源研究所(BGR)先后在本地区开展了地质调查工作。2011 年, Orca 金矿公司获得该区域勘探权, 并随后通过遥感解译识别出了 Galat Sufar 地区的民采矿点, 随后开展了钻探, 发现了 Galat Sufar South 矿体。对 Galat Sufar South 和 Wadi Doum 两个矿体

的资源量进行独立评估, 显示硫化矿和氧化矿总资源量含金 126.04 t, 含银 164.66 t, 其中金品位 1.3~1.2 g/t, 银品位 1.7~1.6 g/t^[24]。该矿床分为东、西 2 个矿段, 分别位于以安山岩为主的 Gabgaba 地体和以海相沉积岩为主的 Halfa 地体中, 二者以 Keraf 缝合带分隔。安山岩系未受到片理化作用, 保存了原始的矿物和结构, 也没有受到褶皱的影响, 火山—沉积岩系的原始层理为东西向。Halfa 地体的沉积岩为受褶皱、逆冲推覆作用的泥质岩、泥灰岩和灰岩, 局部有硅质碎屑岩, 且主要为南北向。整个矿床范围内发育 3 种矿化类型, 分别是 VMS 型、造山型金矿和浅成低温热液型。与安山岩中的块状硫化物矿化伴随的是发育于薄层状片岩中, 广布的剪切带型石英脉和石英细脉群。整个火山—沉积岩系被闪长岩、正长岩和花岗岩类的岩株和岩席侵入^[24]。

(6) Hamama 金矿床

Hamama 矿床位于埃及 Eastern Desert 地块, 目前在 Hamama 矿床已经确定了 3 个矿化带, 分别是 Hamama West, Hamama Central 和 Hamama East, 在整个 Hamama 地区存在许多古代采矿和冶炼设施。Hamama 矿床围岩为新元古代中性变火山岩, 区域上地层被倒转, 底板由安山质熔岩和凝灰岩层组成, 顶板为一系列凝灰质的火山碎屑岩和沉积岩, 都属于新元古代岛弧岩石组合^[37]。Hamama 矿床矿体向北倾斜, 顺走向延伸长 3 km。氧化盖层的平均宽度为 41 m, 金品位为 1.2~3 g/t。硫化带宽可达 75 m, 钻孔中获取了 8~13 m 的块状硫化物, 锌品位约为 5%, Cu 品位为 0.25%~0.4%, Au 品位为 0.30~1.18 g/t, Ag 品位为 37~69 g/t。Aton 公司总共完成 109 个钻孔, 计 11827 m。目前对 Hamama West 矿段进行了储量计算, 显示金当量资源共有 14.87 t, 其中推断的为 10.61 t, 控制的为 4.26 t。矿化位于硅质—碳酸盐岩层内, 包括含金、银和锌的半块状—块状硫化物, 其顶部有一个约 35 m 厚的富金氧化带, 与 Ariab 矿区相似的是局部被硅化重晶石岩覆盖。该矿床显示出 VMS 型—浅成低温热液型混合作用的特征^[37]。

(7) Abu Marawat 金矿床

Abu Marawat 矿床位于 Hamama 东北约 35 km, 目前推测矿石量为 290×10^4 t, Au 品位为 1.75 g/t, Ag 品位为 29.3 g/t, Cu 品位为 0.77%, Zn 品位为

1.15%。该矿床自 1986 年开始由 Minex 公司进行勘查,1995 年 Centamin 公司收购该项目,2007 年 Aton 公司继续勘查完成了地质填图、地球化学采样和地球物理测量,完成钻孔 81 个,总计 18260 m,完成槽探 18 个。该金矿化位于几条细粒石英脉中。矿脉位于一系列热液蚀变的长英质变火山岩中。Abu Marawat 矿床的东部发育一条超镁铁质岩,暗示其接近缝合带^[38]。

3 矿床时空分布规律

3.1 矿床形成时间

已有的矿床学研究和年代学数据表明,东北非地区 VMS 矿床的成矿年龄与其所在的火山沉积岩系的年龄相同^[39],集中于 3 个阶段(图 4)。VMS 矿化在努比亚地盾演化过程中主要形成于莫桑比克洋弧系统的早期阶段,在苏丹约为 890 Ma,在厄立特里亚为 850~830 Ma,在埃及则发育在更成熟的弧和弧后系统中,为 750~695 Ma,富金 VMS 矿床赋存于弧岩浆岩系统中,局部后期可具有造山型金的叠加成矿^[40]。

苏丹东北部 Ariab 地区的拉斑-钙碱性火山岩赋矿围岩形成时间为 890 Ma^[1,41]。Bisha 地区的矿床形成时间可追溯至 850 Ma^[5],厄立特里亚 Asmara 矿床的 Emba Derho 块状硫化物被 Emba Derho 花岗岩(851±14 Ma; 锆石 U-Pb^[42-43])侵入。埃塞俄比亚北部新元古代混杂岩和奥陶纪硅质碎屑岩中碎屑锆石的 SHRIMP U-Pb 年龄约为 740 Ma^[44]。埃及东部沙漠火山岩的年龄一般为 750~730

Ma^[45],Hamama 的矿化可能代表了拉伸纪—成冰纪晚期已发现最晚的 VMS 矿化事件。

3.2 矿床空间分布

东北非地区已发现的 VMS 型矿床大部分位于努比亚地盾的中北部,包括 4 个主要地区(厄立特里亚西部、苏丹东北部、埃及东部、埃塞俄比亚北部),在厄立特里亚和埃塞俄比亚北部分布在近北东向的 Augaro-Bisha-Adobha 成矿带和近南北向的 Asmara-Nakfa 成矿带中,在苏丹东部分布在近东西向的 Nakasib 缝合带和近南北向的 Keraf 缝合带附近,在埃及东部沙漠主要分布在近北西向的 Nugrus 缝合带周边。埃塞俄比亚西部和南部的绿岩带也具有新元古代海相火山岩,但仅有零星的 VMS 矿化迹象,这种分布可能反映了地质历史上原始地块南北之间的差异。此外,VMS 形成的矿体很可能被持续的海底火山作用迅速掩埋,东非造山带经历了多期碰撞增生事件,其直接结果是该地区的大部分 VMS 矿床可能一直处于地下,直到 630 Ma 才开始经历广泛的剥蚀作用^[46]。在 600~530 Ma 的东非碰撞造山过程中,据估计造成了千米规模的剥蚀^[10],因此埋藏在 2~3 km 深度的矿床很可能被剥蚀^[47]。在莫桑比克带的南端,麻粒岩相片麻岩广泛出露^[8,48],暗示其被剥蚀更深,因此 VMS 型矿床未在南部发现。

4 矿床成因与改造

关于 VMS 矿床的形成环境,目前一般认为形成于拉张的应力环境,这种环境多伴有高渗透性断

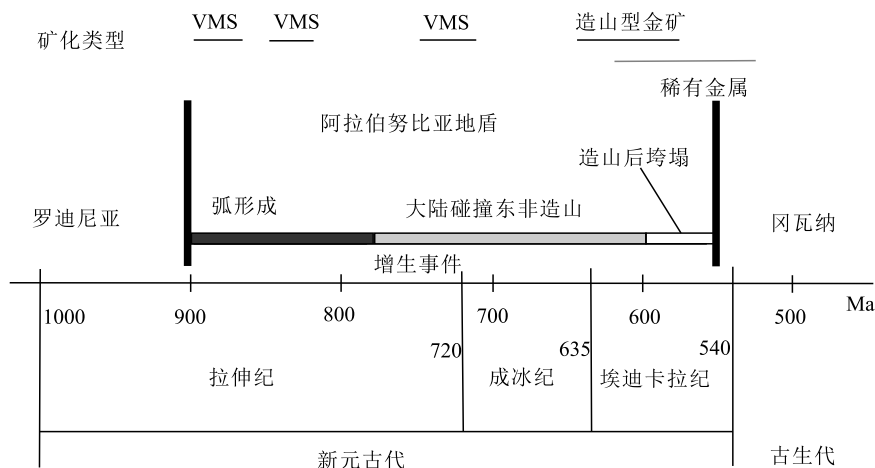


图 4 东北非新元古代主要构造和成矿阶段示意图(据参考文献[35]修改)

Fig. 4 Neoproterozoic major tectonic events and metallogeny stages in Northeast Africa

裂带,为岩体侵入和成矿流体循环提供了条件^[49]。目前,已发现的 VMS 矿床多产于板块汇聚背景下的局部伸展、拉张部位,如岛弧裂谷、陆缘弧前裂谷、弧后裂谷等;现代海底 VMS 矿床主要形成于大洋中脊(太平洋 21°N 类型)、洋内弧后(劳海盆类型)、陆内弧后(冲绳海槽类型)和陆内裂谷(红海海渊类型)4 种环境^[50]。

东北非厄立特里亚 Barka 地体中 VMS 矿床以东部 Asmara 和西部 Bisha 为代表,在新元古代早期(870~800 Ma),Asmara 矿床区发育具有岛弧地球化学亲和性的火山岩与侵入岩,与 VMS 矿体呈侵入接触关系的 Emba Derho 花岗岩岩石地球化学特征表明,其具有典型弧岩浆作用特征,与现代埃达克质岩石类似,其岩浆岩源区来自俯冲洋壳的部分熔融^[25]。因此,Asmara 矿床可能形成于汇聚板块边缘的岛弧环境。Bisha 矿区赋矿围岩具有双峰式组合特点,微量元素特征显示为拉斑玄武岩-钙碱性系列,是受地幔柱影响的原始火山弧玄武岩。Bisha 矿区方铅矿的铅同位素年龄为 790~770 Ma^[5],此年龄对应区域上莫桑比克洋内的岛弧(800~690 Ma),微板块受东西向挤压作用发生俯冲、聚合,在局部由于挤压转换形成剪切和拉张作用,形成一系列岛弧裂谷及弧后裂谷,发育双峰式岩石组合,是典型岛弧裂谷的产物,而岛弧裂谷是一种特殊的弧后盆地^[51]。目前厄立特里亚已发现的 VMS 型矿床在新元古代主要有 2 期,早期位于东侧 Asmara-Nakfa 构造带,主要形成于莫桑比克洋内汇聚板块边缘的岛弧环境;晚期位于西侧 Augaro-Bisha-Adobha 构造带,主要形成于岛弧裂谷或弧后盆地环境。东北非苏丹 Ariab 矿床的块状硫化物虽然在不同的岩层中都有分布,但大多数 VMS 矿体位于厚层安山岩顶部的长英质岩层中,且与重晶石-赤铁矿燧石透镜体相关。长英质岩穹和深部存在类似地球化学性质的杂岩体,暗示存在火山口环境。这种特点与乌拉尔型或阿比提比-诺兰达型的多金属 VMS 矿床的特征相似^[52]。

研究表明,东北非努比亚地盾区的 VMS 矿床经历了构造和风化淋滤富集 2 种形式的改造,由此对矿床开采的经济性产生了显著的优势:强烈的构造运动使 VMS 矿体被褶皱集中,便于开采,矿石贫化较低;风化淋滤和表生富集使区域内 VMS 矿床具有富金的铁帽和浅部蚀变带,使矿山开发的回报

周期较短。

(1) 构造改造

已有研究表明,东北非努比亚地盾区的 VMS 矿床主要形成于洋-陆俯冲过程中形成的岛弧及弧后盆地环境^[8, 13, 19, 26]。在其后的成岩过程中,这些 VMS 矿床在俯冲造山、碰撞造山及造山后大量发育的逃逸构造背景下,经历了强烈的变形变质改造。

对 Bisha 及 Asmara 矿集区中 Emba Derho 与 Debarwa 矿体特征的研究表明,它们均受到剪切作用影响,矿体与赋矿火山岩地层均发生强烈的压扭性褶皱,导致矿体变形强烈,并被后期断裂构造错断^[6]。

对 Asmara 矿集区典型矿床的矿石结构构造特征研究表明,矿石结构为粒状结构、交代结构、填隙结构、压碎结构、交代网状结构、交代残余结构等。矿石构造均为块状为主,局部可见浸染状构造、角砾状构造、碎裂构造、条带状构造等。黄铁矿性脆,常见其在构造压力影响下产生压碎结构,裂隙多被黄铜矿充填。在黄铁矿型锌矿石中可见黑云母交代闪锌矿等金属矿物,是后期变质作用叠加改造的产物。这些现象均表明区域构造应力对围岩、矿石形态的改造作用^[28]。

(2) 风化淋滤富集

对 Bisha 与 Debarwa 矿床的典型矿石类型研究表明,原生块状硫化物矿床形成后,经历了干旱气候下近地表的氧化、淋滤、次生作用。从地表往下,形成较典型的不同类型矿石层位(表 2),依次为氧化矿石(铁帽、自然金)-次生富集矿石(辉铜矿等)-原生硫化物矿石(黄铜矿、闪锌矿)^[5]。

总体看,东北非地区的 VMS 矿床都与新元古代海底火山岩及火山碎屑岩和变质沉积岩相关。矿床往往被蚀变带包围,并表现出一定程度的金属分区,它们由铁、铜、锌或铅的块状或半块状硫化物构成,原生硫化物的金品位为 1~1.5 g/t,金在氧化物和表生带中富集,氧化带金品位可达 5~10 g/t^[11]。铜品位为 0.77%~0.97%,锌品位为 1.22%~4.66%。

5 找矿标志

东北非地区 VMS 矿床的主要控矿因素包括剪切带、褶皱和具有特征的变质火山沉积岩系。区域上,规模较大的剪切带沿走向延伸可达数百千米,它们为区域一级构造,其间发育许多规模较小的平

表 2 Bisha 矿床典型矿石类型矿化特征^[33]

Table 2 Mineralization characteristics of the typical ores in the Bisha mine

矿石类型	岩性	平均品位	厚度及矿化特征
氧化带	铁帽	6 g/t Au	0~10 m 厚,深棕色,Fe、Au 含量高的表层
	半风化层		5~30 m 厚,棕色,Fe、Au 含量高的氧化物,无硫化物
酸性淋滤带	白色硅质粘土层	6 g/t Au	0~15 m 厚,白色,不规则状,硅质淋滤带
	黑色硅质含铅层	25 g/t Au	0.5~1.5 m 厚,黑色,粉末状,富含 Au-Ag-Pb,少量黄铁矿
次生富集带	黄铁矿砂层	10 g/t Au	0.5~5 m 厚,黄色,细粒黄铁矿砂(未固结),贫 Cu 富 Ag
	次生富集硫化物层	4.09% Cu	0.5~15 m 厚,富 Cu 贫 Au 块状硫化物(黄铁矿为主) Cu 含量随深度增加
原生锌矿带	原生硫化物	5%~7% Zn	富 Zn 硫化物

移断层,如前人报道 Debarwa 矿床由于 2 个次级剪切带的顺时针旋转作用,导致其间受挤压弯曲作用,可能对矿床起到活化作用,并使矿体就位于局部拉张的环境^[25]。区域内强烈的造山作用形成一系列褶皱构造,部分地层发生倒转,褶皱作用强烈改变了 VMS 矿体的形态及空间分布,例如 Bisha 矿床的矿体位于背斜中,使矿体更集中^[5]。区域浅变质火山-沉积岩是 VMS 矿床的主要赋矿层位,在火山弧环境中,赋矿层位以一套玄武岩、安山岩、流纹岩及凝灰岩为主的岩石组合为特征,矿体主要赋存于双峰式火山岩中酸性组分的上部。

此外,VMS 矿床围岩蚀变普遍较发育,因此围岩蚀变可作为 VMS 型矿床的重要找矿标志。常见蚀变类型为硅化、钾长石化、重晶石化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、碳酸盐化等,且矿体底板蚀变强于顶板。地球化学勘查中,由于 VMS 矿床具有 Au、Pb、Cu、Zn、Ag、Ba 的组合异常,也可以作为找矿标志。

常规地质调查、地球物理、地球化学勘查手段在块状硫化物矿床的勘查发现中都扮演了重要角色,在东北非地区,化探方法是确定 VMS 矿化位置的最重要方法,除 Au、Pb、Cu、Zn、Ag、Ba 等元素组

合异常外,Mn 晕也是重要的标志,此外 Co/Ni 值也可以区分含矿层与非矿层^[53]。同时,半挥发性金属元素(As、Se、Cd、In、Sn、Sb、Te、Hg、Tl、Bi)也被认为是重要的 VMS 矿化指征,由于 Tl 在富锌 VMS 矿床中常富集,Tl/Co 值可以远距离指示矿化,对于深部找矿具有一定意义^[54]。在化探数据的解析上,近年计算机多元分析和聚类分析可以叠加地质学、矿物学,实现热度图可视化,为圈定靶区提供一定帮助^[55]。寻找深部 VMS 矿体,可利用物探方法。块状硫化物具有中等磁性异常、低电阻-高极化率和高密度的特征,因此激电-重力-电磁等地球物理测量均能发现相关异常,航空磁测能够发现区域断裂和大量火山岩,这些都是 VMS 矿床的重要控矿要素^[56]。电法测量可以很好地推断含铁帽硫化物蚀变带下伏矿体的埋深、形态、倾伏方向,为钻探工程验证提供靶区^[57]。

东北非努比亚地盾区作为全球最重要的块状硫化物型铜金矿和造山型金矿复合叠加产出的成矿区带,已经发现的铜和金资源量总和相当于 1 个超大型铜矿床和 7 个超大型金矿床。加之地质矿产勘查工作程度较低,大量的与 VMS 矿床成矿相关的岩石、构造有利区尚属地质调查工作空白区,存在较好的 VMS 矿床找矿潜力。

6 结 论

(1)东北非地区 VMS 型矿床主要与新元古代拉伸纪莫桑比克洋的弧岩浆作用和弧后拉伸环境的火山岩相关,且矿床多具有金铜富集于浅层的特征。

(2)东北非 VMS 型矿床主要形成于 3 个阶段,在苏丹约为 890 Ma,厄立特里亚为 850~830 Ma,埃及为 750~695 Ma。

(3)东北非已发现的 VMS 矿床主要位于东北非努比亚地盾的中北部,集中于 Barka、Gabgaba、Eastern Desert 地体,找矿远景区位于 Barka、Nakasib、Keraf、Nugrus 缝合带附近。

(4)东北非地区已发现的 VMS 矿床铜、锌、金资源量较大,且区域仍存在较大找矿潜力。

参考文献

[1]Johnson P R,Zoheir B A,Ghebreab W,et al.Gold-bearing volcanogenic massive sulfides and orogenic-gold deposits in the Nubian Shield[J].

- South African Journal of Geology, 2017, 120(1): 63–76.
- [2] 彭自栋, 王长乐, 赵刚, 等. 前寒武纪 VMS 与 BIF 铁矿床共生组合研究进展[J]. 矿床地质, 2017, 36(4): 905–920.
- [3] Piercey S J. An overview of petrochemistry in the regional exploration for volcanogenic massive sulphide (VMS) deposits [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2010, 10(2): 119–136.
- [4] 毛景文, 张作衡, 王义天, 等. 国外主要矿床类型、特点及找矿勘查[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [5] Barrie C T, Nielsen F W, Aussant C H. The Bisha volcanic-associated massive sulfide deposit, western Nakfa Terrane, Eritrea [J]. Economic Geology, 2007, 102(4): 717–738.
- [6] 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.
- [7] Be'eri-Shlevin Y, Katzir Y, Whitehouse M J, et al. Contribution of pre Pan-African crust to formation of the Arabian Nubian Shield: New secondary ionization mass spectrometry U-Pb and O studies of zircon[J]. Geology, 2009, 37: 899–902.
- [8] Stern R J. Arc Assembly and Continental Collision in the Neoproterozoic East African Orogen: Implications for the Consolidation of Gondwanaland[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1994, 22(1): 319–351.
- [9] Hargrove U S, Stern R J, Kimura J I, et al. How juvenile is the Arabian-Nubian shield? Evidence from Nd isotopes and pre-Neoproterozoic inherited zircon in the Bi'r Umq suture zone, Saudi Arabia[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, 252(3/4): 308–326.
- [10] 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.
- [11] Stern R J, Ali K A, Abdelsalam M G, et al. U-Pb Zircon geochronology of the eastern part of the Southern Ethiopian Shield[J]. Precambrian Research, 2012, 206/207: 159–167.
- [12] Kröner A, Stern R J. AFRICA | Pan-African Orogeny [C]// Encyclopedia of Geology. Elsevier, 2005: 1–12.
- [13] Abdelsalam M, Stern B. Sutures and shear zones in the Arabian-Nubian Shield[J]. Journal of African Earth Sciences, 1996, 23: 289–310.
- [14] Drury S A, Berhe S M. Accretion tectonics in northern Eritrea revealed by remotely sensed imagery[J]. Geological Magazine, 1993, 130: 170–190.
- [15] Zoheir B A, Johnson P R, Goldfarb R J, et al. Orogenic gold in the Egyptian Eastern Desert: Widespread gold mineralization in the late stages of Neoproterozoic orogeny[J]. Gondwana Research, 2019, 75: 184–217.
- [16] Kusky T M, Abdelsalam M, Tucker R D, et al. Evolution of the East African and related orogens, and the assembly of Gondwana [J]. Precambrian Research, 2003, 123(2/4): 81–85.
- [17] Andersson U B, Ghebreab W, Teklay M. Crustal evolution and metamorphism in east-central Eritrea, south-east Arabian-Nubian Shield[J]. Journal of African Earth Sciences, 2006, 44: 45–65.
- [18] Ali K A, Azer M K, Gahlan H A, et al. Age constraints on the formation and emplacement of Neoproterozoic ophiolites along the Allaqi-Heiani Suture, Southeastern Desert of Egypt [J]. Gondwana Research, 2010, 18: 583–595.
- [19] Teklay M. Neoproterozoic arc-back-arc system analog to modern arcback-arc systems: evidence from tholeiite-boninite association, serpentinite mudflows, and across-arc geochemical trends in Eritrea, southern Arabian-Nubian shield [J]. Precambrian Research, 2006, 145: 81–92.
- [20] Grenne T, Pedersen R B, Bjerkgård T, et al. Neoproterozoic evolution of Western Ethiopia: igneous geochemistry, isotope systematics and U-Pb ages[J]. Geological Magazine, 2003, 140: 373–395.
- [21] Tsige L. Metamorphism and gold mineralization of the Kenticha-Katawicha area; Adola belt, southern Ethiopia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2006, 45: 16–33.
- [22] Botros N S. Ore Deposits in the Arabian-Nubian Shield [C]// Hamimi Z, Fowler A R, Liégeois J P, et al. The Geology of the Arabian-Nubian Shield. Springer International Publishing, 2021: 585–631.
- [23] Woldemichael B W, Kimura J I, Dunkley D J, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and Sr-Nd isotopic systematic of the Neoproterozoic Ghimbi-Nedjo mafic to intermediate intrusions of Western Ethiopia: a record of passive margin magnetism at 855 Ma? [J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 99: 1773–1790.
- [24] Johnson N. NI 43-101 Independent Technical Report Block 14 project, Republic of the Sudan [EB/OL]. (2014-05-11) [2021-09-01]. <https://orcagold.com/projects/block-14-gold-project/technical-studies/>.
- [25] Ghebreab W, Greiling R O, Solomon S. Structural setting of Neoproterozoic mineralization, Asmara district, Eritrea [J]. Journal of African Earth Sciences, 2009, 55(5): 219–235.
- [26] Barrie C T, Hannington M D. Volcanic-associated massive sulfide deposits: processes and examples in modern and ancient settings: introduction[J]. Rev. Econ. Geol., 1999, 8: 1–11.
- [27] Neil S. Asmara Project Feasibility Study NI43-101 Technical Report [Z]. SENET(Pty)Limited, 2013: 1–150.
- [28] 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.
- [29] Sandy M A, Christopher M, David G T. NI43-101 Technical Report on a Mineral Resource Estimate at the Terakimti Prospect, Harvest Property [EB/OL]. (2014-02-14) [2021-09-01]. <https://eastafricametals.com/harvest/#reports>.
- [30] East Africa Metals. THE Harvest Project [EB/OL]. (2015-10-18) [2021-09-01]. <https://eastafricametals.com/harvest/>.
- [31] East Africa Metals. THE Adyabo Project [EB/OL]. (2016-05-31) [2021-09-01]. <https://eastafricametals.com/adyabo/>.
- [32] 韩世礼. 埃塞俄比亚施瑞地区 VMS 型矿床成矿机制及成矿规律研究[D]. 中南大学博士学位论文, 2013.
- [33] Gribble P, Melnyk J, Munro P. Bisha Mine, Eritrea, Africa. NI 43-101

- Technical Report[Z].Nevsun Resources Ltd.,2013.
- [34] Teklay M,Haile T,Kröner A, et al.A Back-arc Palaeotectonic Setting for the Augaro Neoproterozoic Magmatic Rocks of Western Eritrea[J]. Gondwana Research,2003,6(4): 629-640.
- [35] Bosc R, Tamlyn N, Kachrillo J J. The Hassai Mine project VMS resources update Red Sea State,Sudan.NI 43-101 Technical Report[Z]. La Mancha Resources Inc.,2012.
- [36] Plyley B, Kachrillo J J, Bennett M, et al.Hassai South Cu-Au VMS deposit,Sudan,resource estimate,NI 43-101 Technical Report[Z]. La Mancha Resources Inc.,2009.
- [37] Matt B. NI 43-101 independent technical report Hamama west deposit, Abu Marawat concession, Arab Republic of Egypt[EB/OL]. (2017-01-01)[2021-09-01].<https://www.atonresources.com/investors/reports-and-presentations/>.
- [38] Javier Orduña. Gold and base metal deposits of the Abu Marawat Concession, Egypt[EB/OL]. (2018-03-04)[2021-09-01].<https://www.atonresources.com/investors/reports-and-presentations/>.
- [39] 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.
- [40] Faisal M, Yang X, Khalifa I H, et al. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic Hamamid metavolcanics hosting largest volcanogenic massive sulfide deposits in Eastern Desert of Egypt: Implications for petrogenesis and tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2020, 344: 105751.
- [41] Barrie C T, Abdalla M A F, Hamer R D. Volcanogenic Massive Sulphide-Oxide Gold Deposits of the Nubian Shield in Northeast Africa[C]//Bouabdellah M Slack J F. Mineral Deposits of North Africa. Cham.: Springer International Publishing (Mineral Resource Reviews), 2016: 417-435.
- [42] Ghebretensae G F, Yao H Z, Zhao J H, et al. Neoproterozoic magmatism in the southern Arabian-Nubian Shield: implications for petrogenesis and tectonic setting[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 44: 6525-6545.
- [43] Ghebretensae G F, Yao H Z, Zhao K, et al. Petrogenesis and tectonic implications of the Neoproterozoic adakitic and A-type granitoids in the southern Arabian-Nubian shield[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(14): 428.
- [44] Avigad D, Stern R J, Beyth M, et al. Detrital zircon U-Pb geochronology of Cryogenian diamictites and lower Paleozoic sandstone in Ethiopia (Tigrai): age constraints on Neoproterozoic glaciation and crustal evolution of the southern Arabian-Nubian Shield[J]. Precambrian Research, 2007, 154: 88-106.
- [45] Ali K A, Azer M K, Gahlan H A, et al. Age constraints on the formation and emplacement of Neoproterozoic ophiolites along the Allaqi-Heiani Suture, Southeastern Desert of Egypt[J]. Gondwana Research, 2010, 18: 583-595.
- [46] Stern R J, Avigad D, Miller N R, et al. Geological Society of Africa Presidential Review #10: Evidence for the Snowball Earth Hypothesis in the Arabian-Nubian Shield and the East African Orogen[J]. Journal of African Earth Sciences, 2006, 44: 1-20.
- [47] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. Ore Geology Reviews, 2001, 18: 1-75.
- [48] Fritz H, Abdelsalam M, Ali K A, et al. Orogen styles in the East African Orogen: a review of the Neoproterozoic to Cambrian tectonic evolution[J]. Journal of African Earth Sciences, 2013, 86: 65-106.
- [49] Tomos F, Peter J M, Allen R, et al. Controls on the siting and style of volcanogenic massive sulphide deposits[J]. Ore Geology Reviews, 2015, 68: 142-163.
- [50] 李文渊. 块状硫化物矿床的类型、分布和形成环境[J]. 地球科学与环境学报, 2007, 4: 331-344.
- [51] 侯增谦, 韩发, 夏林圻, 等. 现代与古代海底热水成矿作用——以若干火山成因块状硫化物矿床为例[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-11.
- [52] Herrington R, Maslennikov V, Zaykov V, et al. Classification of VMS deposits: Lessons from the South Uralides[J]. Ore Geology Reviews, 2005, 27(1/4): 203-237.
- [53] 王登红. 块状硫化物矿床的地球化学找矿标志[J]. 地质科技情报, 1994, (2): 81-86.
- [54] Genna D, Gaboury D. Use of semi-volatile metals as a new vectoring tool for VMS exploration: Example from the Zn-rich McLeod deposit, Abitibi, Canada[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2019, 207: 106358.
- [55] Feltrin L, Bertelli M. Using Clustered Heat Maps in Mineral Exploration to Visualize Volcanic-Hosted Massive Sulfide Alteration and Mineralization[J]. Natural Resources Research, 2020, 29(1): 311-344.
- [56] Hendrickson M D. Geologic interpretation of aeromagnetic and chemical data from the Oaks Belt, Wabigoon subprovince, Minnesota: implications for Au-rich VMS deposit exploration[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2015, 53: 176-188.
- [57] 甘凤伟, 王京彬, 朱思才, 等. 埃塞俄比亚北部 VMS 型铜多金属矿快速勘查方法[J]. 矿产勘查, 2018, 9(8): 1611-1621.