

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2019.01.009

东北非努比亚地盾金矿成矿地质特征与找矿标志

雷义均, 王建雄, 姚华舟, 陈开旭, 李 勇, 刘国庆

LEI Yi-Jun, WANG Jian-Xiong, YAO Hua-Zhou, CHEN Kai-Xu, LI Yong, LIU Guo-Qing

(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), 武汉 430205)

(Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation Center for Geosciences), Wuhan 430205, Hubei, China)

摘要:东北非金矿的矿床类型、成矿条件与努比亚地盾演化密切相关。努比亚地盾金矿类型,按成因可分为两大类:一类是与造山带有关的韧性剪切带金矿,即造山型金矿;另一类是弧-弧拼合过程中形成的火山成因块状硫化物金矿,即VMS型铜-金矿。受韧性剪切带控制的造山型金矿形成于闭合-碰撞造山阶段,与弧-弧碰撞缝合带展布方向一致的北东向韧性剪切带为造山型金矿的主要控矿构造,该类型矿床规模以中小型为主。沿韧性剪切带成带分布的火山成因块状硫化物(VMS型)金矿床形成于洋壳俯冲-岛弧的形成阶段,其形成环境为岛弧裂谷或弧后裂谷环境,矿床规模以大型为主,成群分布于5个矿集区内。本文总结了该地区造山带型和VMS型金矿的主要特征,并依此提出在该地区寻找这两种类型金矿的找矿标志。

关键词:成矿地质特征;火山成因块状硫化物(VMS型)金矿床;造山型金矿;找矿标志;努比亚地盾;东北非

中图分类号:P612

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2019)01-0090-09

Lei Y J, Wang J X, Yao H Z, Chen K X, Li Y and Liu G Q. Geological Characteristics and Prospecting Criteria of Gold deposits in Nubian Shield, NE Africa. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2019, 35(1): 90-98.

Abstract: The types and metallogenic conditions of gold deposits in Northeast Africa are closely related to the evolution of the Nubian shield. Gold deposits in Nubian shield can be subdivided into two types according to their genesis: one is ductile shear zone gold deposits related to orogenic belts, i.e. orogenic gold deposits; the other is volcanic massive sulfide gold deposits formed during Arc-arc combination, i.e. VMS type copper-gold deposits. The orogenic gold deposits controlled by ductile shear zone were formed in the closed-collision orogenic stage. The NE-trending ductile shear zone, which is consistent with the distribution direction of Arc-arc collision suture zone, is the main ore-controlling structure of orogenic gold deposits. The scale of this type of gold deposits is mainly small and medium-sized. Volcanic massive sulphide type (VMS) gold deposits distributed along ductile shear zones were formed in the stage of oceanic crust subduction-island arc formation. They were formed in island-arc rift or back-arc rift environments. The deposits were mainly large-scale and distributed in clusters in five ore concentration areas. This paper summarizes the main characteristics of orogenic belt type and VMS type gold deposits in this area, and prospecting criteria for these two types of gold deposits are summarized as well.

Key words: metallogenic geological characteristics; volcanic massive sulfide (VMS) gold deposits; orogenic gold deposits; prospecting indicators; Nubian shield; Northeast Africa

收稿日期:2018-11-15;修回日期:2019-1-12;责任编辑:庞迎春

资助项目:中国地质调查局“全球多尺度地球化学填图”工程之子项目“东北非低密度地球化学填图”(项目编号:科[2015]06-02-01-006), “北部非洲大型铜金资源基地评价”(DD20190443)

第一作者:雷义均(1965—),男,教授级高级工程师,从事地质矿产调查研究工作,E-mail:yc502lyjun@aliyun.com

努比亚地盾是阿拉伯-努比亚地盾的一部分, 出露范围包括埃及东南部、苏丹东北部、厄立特里亚(以下简称“厄特”)全境和埃塞俄比亚(以下简称“埃塞”)北部。该区在其漫长的地质演化史中, 经历了元古宙复杂的构造、岩浆、变质作用和显生宙局部裂谷盆地的沉降作用。前寒武纪的构造演化在地史中占有重要的地位, 是研究新元古代冈瓦纳大陆的形成与裂解的理想场所; 中新生代的裂谷沉降作用和构造岩浆活动也与区域成矿地质作用密切相关。

东北非苏丹、厄特和埃塞三国均列为世界上最不发达国家, 经济单一且落后, 目前三国均大力发展矿业经济, 主要目标是该区域的优势矿种贵金属。努比亚地盾是非洲大陆黄金资源主要产地之一, 矿床具有成带分布、成群集中的特点, 特别是 VMS 型金多金属矿床, 单个矿体规模大, 呈块状和囊状出露于地表, 易于露天开采, 是金矿勘查开发的主要目标类型。近几十年来, 国际矿业公司纷纷进驻东北非三国, 开展了大规模的勘查工作, 特别是自 2000 年以来, 在苏丹东北部、厄立特里亚和埃塞俄比亚北部分别发现了多个火山成因块状硫化物(VMS 型)金矿床, 以及受韧性剪切带控制的造山型金矿, 引起了国际矿业界和地学界的广泛关注, 同时也积极推动了地学方面的研究工作, 在地质构造演化、成矿地质背景、成矿规律和矿床成因等方面的研究工作取得了许多新认识^[1-11]。本文总结了该区域金矿床最新的研究成果, 为下一步的找矿勘查工作提供依据。

1 成矿地质背景

努比亚地盾属于东非造山带的一部分, 位于红海以西, 长约 1 800 km, 宽约 600 km, 与红海以东的阿拉伯地盾一起统称为努比亚-阿拉伯地盾(ANS)。努比亚地盾西侧为撒哈拉克拉通, 以 Ker-af-kabus-sekeer 缝合带为界, 南部则为莫桑比克带(图 1)。

1.1 岩石地层

撒哈拉克拉通为太古宇-中元古界基底, 以变质核杂岩为主, 变质核杂岩又强烈地遭受到发生于新元古代的泛非构造热事件的改造作用, 呈活化的前寒武纪基底岩系出露。太古宙地层主要为麻粒岩相片麻岩, 大多被显生宙沉积地层不整合覆盖, 以

构造窗形式出露; 古中元古代主要为角闪岩相角闪片麻岩和角闪岩组成。一般认为莫桑比克带为太古宙-中元古代基底。基底变质地层中均发育大量同-后构造期花岗岩或花岗闪长岩类等岩体。

努比亚地盾形成于新元古代岛弧和弧后增生过程, 主要为低级变质的绿片岩相, 局部可见少量中级变质的角闪岩相, 是一套火山沉积变质系列和双峰式火山岩组合, 常称为绿片岩组合。绿片岩组合包括了安山岩、玄武岩、流纹岩、玻屑沉积以及变硬砂岩、大理岩和板岩。在显生宙时期, 努比亚地盾之上局部存在少量陆相碎屑沉积系列, 北部地区以中生代努比亚砂岩为主, 南部以新近纪至第四纪未固结的表生沉积物为主; 在苏丹沿中非断裂带两侧, 分布有与该断裂带频繁活动有关的新近纪喷出的玄武质火山岩; 在苏丹、埃塞与厄特三国交界地带也出露有新近纪至古近纪喷出的玄武质火山岩, 可能与东非大裂谷活动有关。

1.2 主要构造

努比亚地盾的西侧为撒哈拉克拉通, 撒哈拉克拉通与努比亚地盾缝合带为陆-弧缝合带(Ker-af-kabus-sekeer 缝合带), 而努比亚地盾内部各弧地体之间则为弧-弧缝合带, 这些缝合带均由断续分布的蛇绿岩或镁铁质-超镁铁质岩标示。自北而南存在主要的缝合带有: Allaqi-Onib-Heiani 缝合带, Nakasib 缝合带, Baraka 缝合带(图 1)。判断这些区域构造带为弧-弧缝合带的主要依据有: (1) 构造带均为区域性的大断裂, 大部分构造带表现为褶皱带、冲断层及走滑剪切断裂系统; (2) 高应变带中断续存在蛇绿岩碎片, 尽管这些蛇绿岩碎片经过褶皱推覆体的运移, 偏离了原缝合带的位置, 但蛇绿岩碎片还是存在于岩层碰撞所形成的较宽的变形带中; (3) 这些缝合带分割了不同年龄的弧地体。

Allaqi-Onib-Heiani 缝合带: 该缝合带走向 SE-NE, 是一条由埃及南部至苏丹北部广泛分布蛇绿岩带的变形带^[3], 将南部的 720-830 Ma 的 Gebeit 地体与北部 Midyan-south 地体分隔。

Nakasib 缝合带: 该缝合带从西部尼罗河附近一直延伸到阿拉伯中部, 将东南部的 800-900 Ma 的 Haya 地体与西北部的 720-830 Ma 的 Gebeit 地体分隔^[4]。变形年代为 800-750 Ma, 构造类型为早期 SE 向延展的蛇绿岩推覆体, 晚期 NE 向的直立褶皱^[5]。

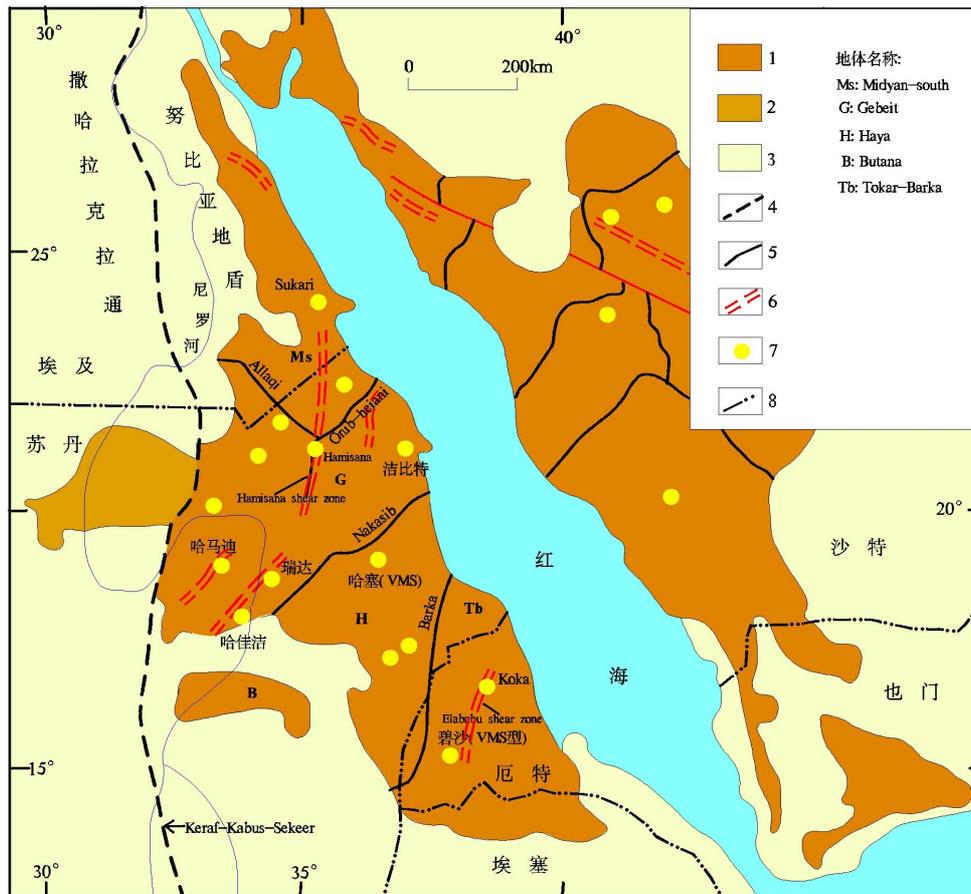


图1 努比亚地盾区域构造图(附造山型金矿分布) (据文献[1-2]修编)

Fig. 1 Regional geological map of Arabian-Nubian shield

1-新元古代地壳;2-早太古-中元古代地壳;3-显生宙盖层;4-Keraf-kabus-sekeer弧陆缝合带;5-地体弧陆缝合带;6-主要韧性剪切带;7-主要造山型金矿床;8-国界线。

Baraka 缝合带:为苏丹东部和厄立特立亚西部的近南北向的缝合带,将 Haya 地体与 Toker-Barka 地体分隔。变形年代 820-760 Ma,构造类型:走向北的左旋压剪^[5]。

Hamisana 剪切带:该剪切带是努比亚地盾中规模较大的一条近南北向的构造变形带,由苏丹北部向北延伸到埃及南部,形成于 660-610 Ma^[5],为右旋剪切带,表现为直立褶皱和紧闭褶皱,并错断了 Allaqi-Onib-Heiani 缝合带,构造研究表明该带是东西向挤压缩短的产物^[6],为后增生构造(图 1)。

1.3 构造演化

努比亚地盾记录了一个长期的地壳演化历史,经历了从大洋俯冲、岛弧的形成及弧后岩浆作用到与大陆板块碰撞和地体的合并,再到新生地壳的挤压缩短、走滑剪切和伸展一系列的构造演化过程。ANS 形成于东、西冈瓦纳大陆之间,是由一系列岛

弧、弧后盆地、微板块(地体)在泛非造山运动晚期聚合而成^[7]。努比亚地盾各地体的构造演化时段,目前还没有一致的结论,Johnson 等^[8]认为 ANS 是 900-550 Ma 期间冈瓦纳超大陆汇聚过程中形成的增生造山带。Fritz 等^[9]对努比亚地盾的构造演化进行了系统总结,现将其最新研究成果分述如下(图 2)。

(1)海底扩张-洋盆的形成(850-750 Ma):新元古代末,大约 850-750 Ma 罗迪尼亚泛大陆开始发生的裂解事件,被认为是冈瓦纳旋回的前奏,表现为广泛发育的拉伸裂谷作用以及陆内盆地和洋盆的形成,即形成所谓的莫桑比克洋。关于罗迪尼亚泛大陆破裂的时间部分学者认为在 750-600 Ma^[9],目前观点没有统一,争议较大。

(2)洋壳俯冲-岛弧的形成(800-650 Ma):大洋岛弧/弧后盆地混杂体同时堆积形成了阿拉伯-努比亚地盾新生物质,地体的增生导致了弧陆缝合带

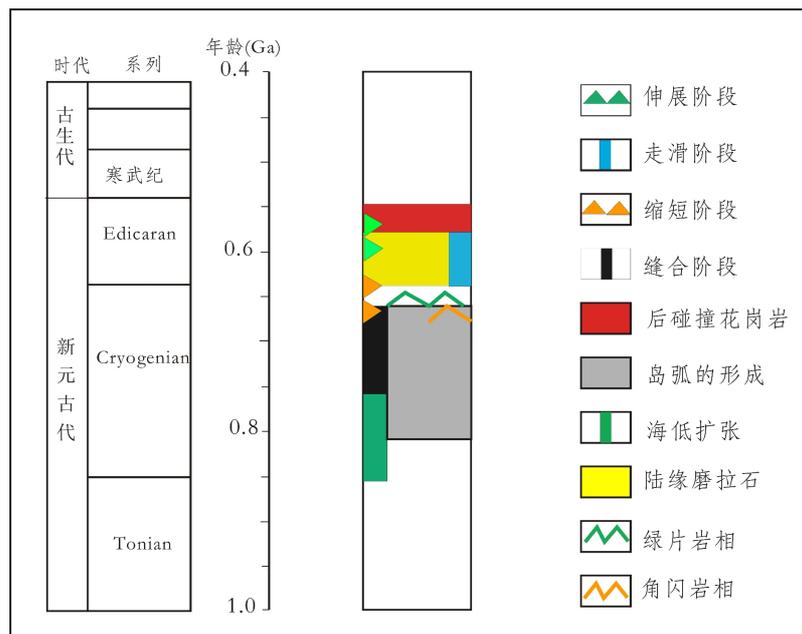
图2 努比亚地盾地质构造演化示意图^[8]

Fig. 2 Geological and tectonic evolution map of Arabian-Nubian shield

的形成^[5],该阶段经历了从大洋俯冲、岛弧形成及弧后的岩浆作用到大陆板块碰撞地体的拼合。这期间形成了大量岛弧和沉积盆地,并伴随钙碱性、碱性岩浆岩的侵入^[10]。俯冲过程形成的岛弧岩浆岩以玄武岩、玄武质安山岩为主,少量凝灰岩呈层状发育在弧内盆地中,弧后盆地则发育大量蛇绿岩。至此,阿拉伯-努比亚地盾大部分地壳已经形成,此过程中形成了广泛分布的火山成因块状硫化物(VMS型)金矿床。

(3) 闭合与碰撞造山阶段(750–550 Ma):前一阶段大陆板块地体的拼合导致了大量缝合带的形成。弧-弧拼合以及与西部撒哈拉克拉通前新元古代大陆板块相碰撞,产生了一系列的挤压缩短、走滑剪切和伸展构造以及后碰撞花岗岩的侵入。此过程中形成了大量的造山型金矿。关于后碰撞花岗岩的侵入时段,存在较大的争议,Abdel-Rahman^[11]在埃及东南部 Midyan-south 地体中测得花岗岩 Rb-Sr 同位素年龄值为 522 Ma,反应了后构造期花岗岩侵入活动持续到早古生界。

(4) 后造山阶段(550 Ma -古近纪):中生代由于近东西向中非大断裂的频繁活动,在苏丹沿中非大断裂两侧有大量的玄武岩喷出及裂谷盆地沉积;新生代由于受东非大裂谷活动影响,在厄特和埃塞也有玄武质火山岩喷出。

2 主要金矿特征

努比亚地盾是非洲大陆重要的铜金矿聚集区,也是人类最早进行岩金开采的地区之一,早在 3500 年前的古埃及法老时期,就已经在红海山脉开展了采金活动。21 世纪以来,由于大量的国际矿业资金的涌入,以及新技术和新方法的应用,在覆盖区和老矿山周边及深部,不断发现新矿床,成为世界上矿业勘查热点地区之一。

努比亚地盾金矿类型,按成因可分为两大类:一类是与造山带有关的韧性剪切带金矿,即造山型金矿;另一类是弧-弧拼合过程中形成的火山成因块状硫化物金矿,即 VMS 型铜-金矿。从目前已发现和开采的情况来看,造山型金矿尽管分布范围较广,但以中小型矿床为主;铜-金 VMS 型矿床常常成群分布,单个矿床规模大,是该区域最重要的金矿类型,如产于苏丹境内的哈塞铜-金矿床、产于厄立特利亚境内的碧沙铜-金矿床等均为大型或特大型矿床(图 4)。

2.1 造山型金矿

2.1.1 基本特征

努比亚地盾中的造山型金矿,是东北非国家开采的金属矿种之一,目前正在开采和勘查的与韧性

剪切带有关的金矿床,由于规模为中小型,大多为民间开采。目前开采的有两种类型的矿石,一种是基岩区剪切带中的岩金,另一种是岩金经地表长期风化剥蚀形成的残积和坡积金。由于韧性剪切带型金矿在埃及南部、苏丹东部、厄特西部和埃塞北部广泛分布,大小众多的采矿场星罗棋布。

与造山作用有关的韧性剪切带型金矿,空间上受挤压变形、剪切、走滑断裂的控制,剪切带的变形程度和发育规模与金矿床的产出规模呈正相关关系,如贯穿于 Gebeit 地体与 Midyan-south 地体中的 Hamisana 剪切带,在埃及发现了 Sukari 金矿,在苏丹发现了 Hamisana 金矿;Toker-Barka 地体中的 Elababu 剪切带中,在厄特发现了 Koka 金矿。这些金矿典型特征为在一个中型矿床周围,存在众多小型矿床和矿点,具有沿剪切带成带分布、成群集中的特点(图1)。同一矿床中存在两种类型的金矿体,蚀变岩型金矿体产于韧性剪切带中的韧性变形域内,石英脉型金矿体产于韧性剪切带中的脆性变形域内,两种类型的金矿体呈一定角度斜列产出。金矿床既产于主剪切带中,也产于主剪切带形成的次一级的剪切带中。矿床围岩地层大部为低级变质的绿片岩相,少量为中级变质的角闪岩相。

2.1.2 矿床实例

努比亚地盾中与造山带有关的韧性剪切带型金矿,具有典型韧性剪切带型金矿床的特征,苏丹哈马迪(Hamadi)金矿床就是一个例子。

哈马迪金矿床为中型矿床(见图1),金储量 20 t,总体受北东向韧性剪切带控制,按矿体特征可分为东、西两个矿段,两个矿段在控矿地质特征、矿体产出特征、矿石类型等方面均存在明显的差异(图3)。

区内主要出露新元古代地层,岩性为斜长角闪片麻岩、绢云母石英片岩、云母片岩、钠长石英片岩等,区内还见少量大理岩呈厚层状产出。区内地层由于受构造影响,在西部和北部片岩的片理总体呈北东向展布,倾向北西,倾角 20° – 50° ;在东部和南部的片理方向近南北向,倾向西,倾角 40° – 60° 。绢云母石英片岩和斜长角闪片麻岩为矿区主要的矿化围岩。

从规模上看,西矿段为主矿段,产于北东向韧性剪切带中韧性变形域中,矿体为蚀变岩型。矿体主要产于绢云母石英片岩和绿泥片岩内,围岩蚀变强烈。剪切带内糜棱岩、构造透镜体发育,岩石重结晶、眼球状构造、鞘褶皱和石香肠构造现象普遍。矿体呈层状、似层状、透镜状产出,矿体产状与片理化带的产状基本一致。矿体长数百米至两千米,厚 2.5–7 m,总体走向 $NE30^{\circ}$,倾向 NW,倾角 43° – 49° ,

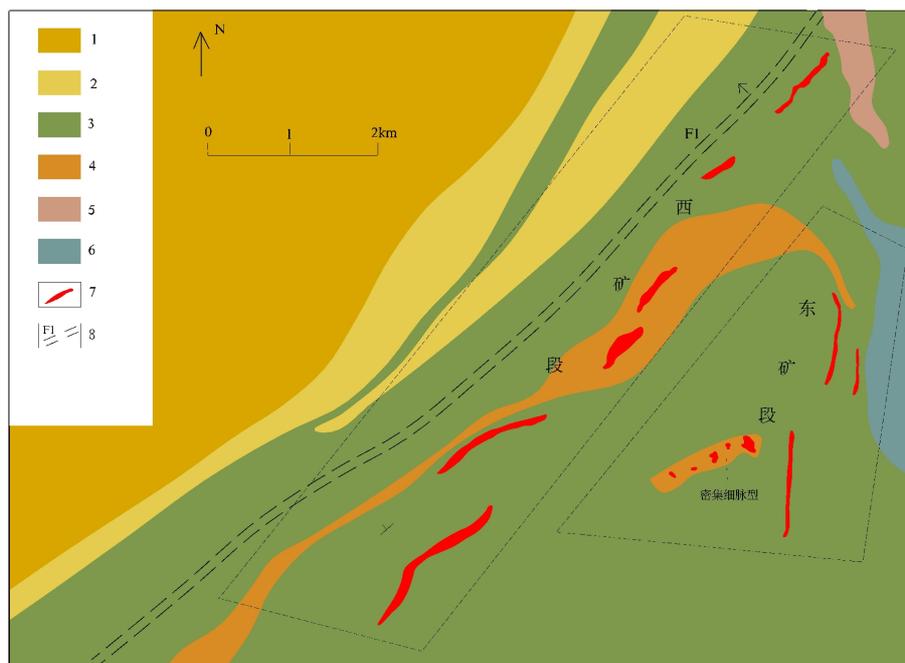


图3 哈马迪金矿床地质简图(据文献[12]修编)

Fig. 3 Simplified geological map of the Hamadi gold deposit

1-变粒岩;2-角闪片岩;3-绢云母石英片岩、绿泥片岩;4-闪斜片麻岩;5-大理岩;6-含硅铁碳酸盐岩;7-金矿体;8-韧性剪切带。

矿石加权平均品位 8.43×10^{-6} 。矿体沿走向厚度和品位变化较大,矿体向深部有变富的趋势。

东矿段矿体产于韧性剪切带脆性变形域中,为石英脉型,石英脉总体走向近南北向,倾向西,倾角 $45^{\circ} \sim 53^{\circ}$,石英脉产状一部分穿切围岩片理,一部分与围岩片理产状基本一致,石英脉充填于张性裂隙之中。石英脉型又可分为石英大脉型和密集细脉型。石英大脉一般厚 $0.3 \sim 1$ m,金品位变化大;密集细脉型中的单条石英脉厚度一般小于 10 cm,平行产出,在 1 m 宽范围内可见到 $3 \sim 10$ 条,密集细脉型矿体厚度 $3 \sim 8$ m,局部达 $15 \sim 20$ m,常常在局部膨大,形成囊状矿体(图 3)。石英脉型矿体平均品位 2×10^{-6} ,最高达 92×10^{-6} [13]。

哈马迪金矿矿石为贫硫化物型,矿物组合简单。有用矿物为自然金,局部见少量孔雀石和方铅矿;脉石矿物为黄铁矿、白铁矿、石英、云母和钠长石等。围岩蚀变主要为硅化、绢英岩化和黄铁绢英岩化,其次有绿帘石化、绿泥石化和碳酸盐化。

哈马迪金矿床是典型韧性剪切带型金矿,按矿石分类,既有构造蚀变岩型,也有含硫化物石英脉型,并且两种类型的矿体走向夹角达 $30 \sim 40^{\circ}$,呈斜交状产出。产于红海山脉的 Hamisana 韧性剪切带型金矿也具有相同的产出特征(图 1),这些都与我国著名的胶东焦家韧性剪切带型金矿相类似 [14]。

李辉等 [15] 对哈马迪金矿稀土元素分布、硫同位素特征、氢氧同位素组成等方面的研究表明,哈马迪金矿成矿物质主要来源于新元古代中-基性变质火山岩系,成矿热液以变质热液为主;矿体和围岩稀土元素分布特征一致性和矿体硫同位素示踪均显示矿体和围岩的同源性,同为来源于接近地幔的中-基性火山岩;角闪片岩、斜长角闪片麻岩、绿泥片岩和绢云母石英片岩等矿体围岩含金背景值高,为金矿的初始矿源层。

2.2 火山成因块状硫化物(VMS型)铜-金矿床

2.2.1 基本特征

产于努比亚地盾中的 VMS 型 Cu-Au 矿床,主要产于 6 个矿集区中(图 4),其中苏丹境内分布 Hamisana 矿集区、Ariab 矿集区和 Eyob 矿集区,厄立特里亚境内分布 Bisha 矿集区和 Asmara 矿集区,埃塞俄比亚境内分布施瑞矿集区,区域内已开采和探明金储量千余吨,其中 Ariab 矿集区,由加拿大 La Mancha 资源有限公司 2005 年开始再勘探,截止 2009 年新增探明金储量达 170.55 吨 [16]。VMS 型 Cu-Au 矿床形成于努比亚地盾各块体早期缝合作用和岛弧岩浆作用,目前普遍认为存在两种成因模式,一是火山沉积过程形成的 VMS 型同生贫金矿化在后期区域变形中富集了金;二是同火山沉积过程产生的富金热液形成的金矿化。

VMS 型 Cu-Au 矿床围岩地层常常为一套浅变质的沉积岩和火山沉积岩。沉积地层主要由浅变质的硅质碎屑岩、杂砂岩、砂泥岩、页岩、碳酸盐岩、砾岩等组成;火山沉积岩地层主要有浅变质的长英质凝灰岩、长英质火山角砾岩,以及少量镁铁质凝灰岩。火山岩地层显示出一套双峰式火山岩组合,主要由流纹岩、霏细岩、英安岩、玄武岩等组成,其中以流纹岩组分为主。矿体主要赋存于双峰式火山岩中酸性组分的上部。矿区内常常发育褶皱构造和冲断构造,致使原生的 VMS 型矿床形成以后遭受了不同程度的构造挤压变形作用。

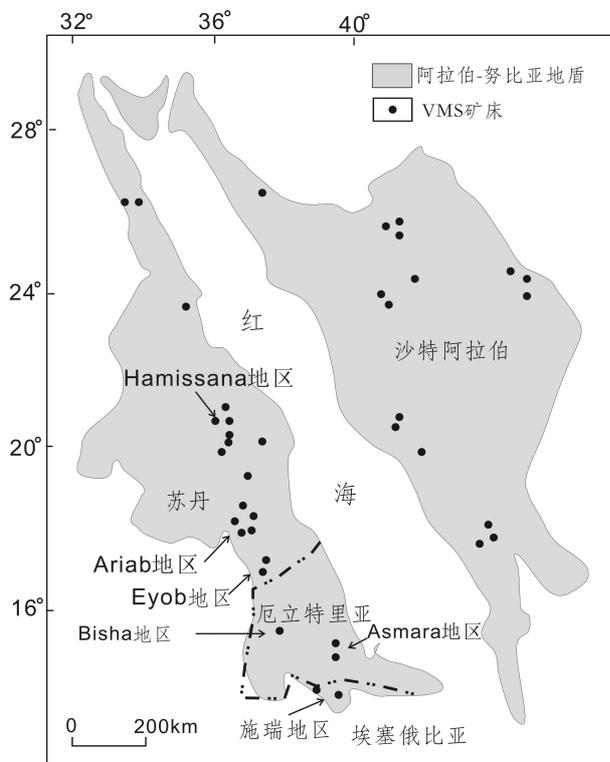


图4 阿拉伯-努比亚地盾VMS型矿床分布图
(据文献[17]修改)

Fig. 4 Distribution map of VMS deposits in Arabian-Nubian shield

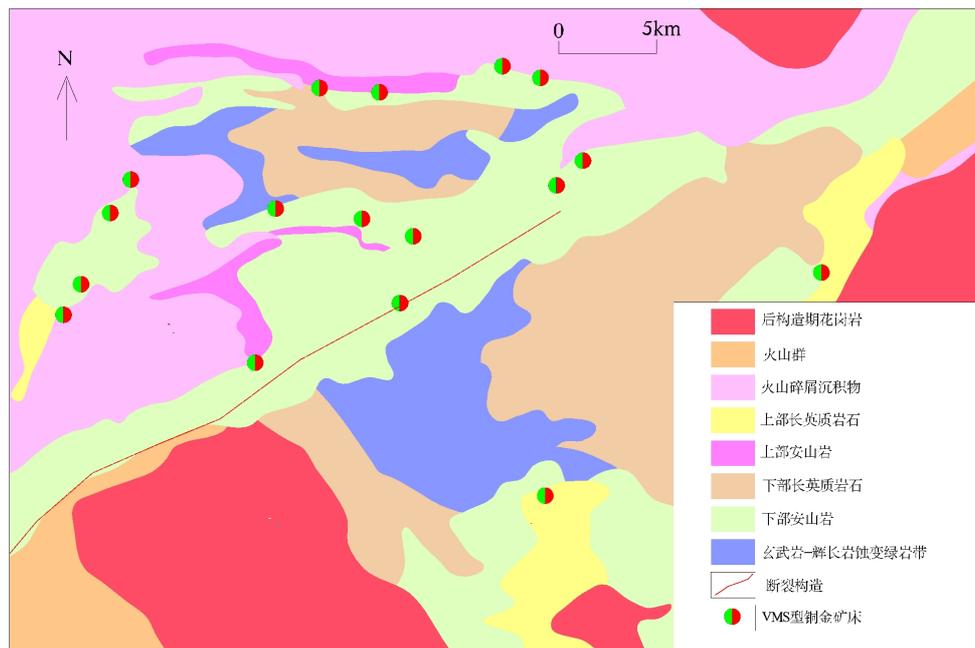


图5 Ariab矿集区地质矿产图(据文献[17]修改)

Fig. 5 Geological and mineral map of Ariab ore concentration area

2.2.2 矿床实例

Ariab 矿集区火山成因块状硫化物 (VMS 型) 矿床产于 Ariab 新元古代绿岩带内(图 5)。主岩包括双峰式火山岩、火山碎屑和硅质碎屑岩地层,及同-后构造构造花岗岩。大多数 VMS 型矿床产于蚀变酸性凝灰岩中。Ariab 矿集区内的岩石系列统称为 Ariab 岩石系列,大致分为五个单元。A 单元为玄武岩单元,被闪长岩和辉长岩切割; B 单元由厚层的安山岩和英安质熔岩与火山碎屑岩组成; C 单元为酸性和富钠流纹岩和流纹英安岩熔岩、凝灰岩; D 单元含有块状硫化物和金矿床,是主要的赋矿围岩,厚度变化大(10-100 m),且不连续,由中性-基性熔岩组成,居于 C 单元之上; E 单元不整合覆盖于火山岩之上,为厚层火山碎屑岩和硅质碎屑岩序列。区内深成侵入岩体少部分与火山沉积作用是同期的,但大部分是后构造期侵入的。稀土元素和微量元素研究表明,区内岩浆作用从拉斑玄武质岛弧火山作用向钙碱性火山作用演化,前者是岩系的基础,后者与矿化作用有关。Ariab 岩石系列基本构造格架为火山岩分布于 NEE-SWW 向展布的复背斜的核部,倾向北西,伏于沉积岩之下,北东和北西向两组断裂切穿了所有岩层。

Ariab 矿集区 VMS 型矿床主要矿石类型为石

英-高岭石-重晶石金矿,包括地下原生矿和地表氧化矿两部分,地表氧化矿可分为地表部分的含金铁帽和地下部分的含金“硅石-重晶石岩”(“SBR”),两者都是下伏多金属块状硫化物矿床风化淋滤的产物。地表含金铁帽,分布于地表至地下 20 m 左右,平均含量 1.5×10^{-6} ; 含金“硅石-重晶石岩”(“SBR”),分布于地下 20 m 至 50 m,平均含量 $5 \times 10^{-6} \sim 8 \times 10^{-6}$; 地下 50 m 至 100 m 为次生富集矿,平均含量 $8 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 。矿体含金上贫下富,并且矿体具有顶部富锌、底部富铜的特点。地下 100 m 以下为原生矿,铜金含量较低。多数矿化呈 0.3~>25 m 厚的扁平矿体出现。在 Hadal Awatib East 矿床,矿化沿走向已追索到 2500 多米。硫化物呈块状、细粒和层状,局部角砾状,主要金属矿物为黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿,含少量方铅矿、黝铜矿-银黝铜矿和毒砂。主岩热液蚀变类型为硅化、绿泥石化、绢云母化和局部碳酸盐化。

Barrie 等^[18]通过 Pb 同位素定年得到厄立特里亚碧沙 VMS 型金矿的成矿年龄为 790-770 Ma,通过岩石地球化学全岩主、微量元素测试,认为矿区内火山岩以钙碱性系列为主,具有双峰式火山岩组合,且具有弧火山岩的特征。加拿大 La Mancha 资源有限公司^[16]对苏丹 Ariab 矿集区不同矿床 9 个样

品铅同位素样品测试结果,Ariab 矿集区 VMS 型矿床的最佳年龄估计是 702 ± 15 Ma。这些年龄数据均表明 VMS 型矿床形成于洋壳俯冲-岛弧的形成(800-650 Ma)阶段。

3 找矿标志

努比亚地盾处于撒哈拉沙漠的东部边缘,气候炎热干燥,地理上称为红海山脉,除部分山谷地洼处被沙漠覆盖外,大多岩石出露良好,因此,总结该区域主要矿种的找矿标志,对于寻找相似矿床具有重要的指导意义和实用价值。根据该区域已发现和开采的矿床资料,将造山型金矿和火山成因块状硫化物(VMS 型)铜-金矿床找矿标志分别归纳如下。

3.1 造山型金矿找矿标志

(1)地层标志:由中-基性火山岩变质的绿片岩,由于其原岩含金背景值高,因此,金矿大多产于绿片岩中。

(2)构造标志:造山型金矿受韧性剪切带控制,金矿体常常产于韧性剪切带构造产状在空间上的变化部位,并且在韧性剪切带的韧性域内产出蚀变岩型金矿,而在其旁侧的脆性域内则产出石英脉型金矿。该区域内的韧性剪切带以北东向为主,韧性剪切带规模与矿床的产出规模呈正相关关系。

(3)岩浆岩标志:韧性剪切带构造内如果有岩浆岩侵入,则有利于金矿的进一步富集,产出的金矿往往规模大、品位富。岩浆岩在成矿作用中不仅提供热源,而且带入新的成矿物质,对原矿体产生热液叠加改造作用。

(4)围岩蚀变标志:产于韧性剪切带内的金矿,热液蚀变十分发育,主要有黄铁矿化、硅化、绢云母化和绿泥石化等,特别是黄铁绢英岩化蚀变是主要找矿标志。

(5)地球化学异常标志:区域内受韧性剪切带控制的金矿,最有利的化探元素异常组合为 Au、Ag、Cu、Pb、As 元素组合。

(6)遥感信息标志:由于矿化蚀变和岩石的构造形变,韧性剪切带在遥感影像上表现为线性构造,是很好的识别标志。在遥感信息提取方面,含铁和含羟基矿物异常作为两大类近矿围岩蚀变是遥感间接找矿的重要标志。

3.2 火山成因块状硫化物(VMS 型)铜-金矿床找矿标志

(1)地层标志:VMS 型矿床主要赋矿围岩由钙碱性的火山岩、火山碎屑岩及整合上覆的变沉积岩组成,代表了一个残余岛弧及弧后盆地岩石组合,且具有双峰式火山岩组合,矿体主要产在中酸性火山岩系中。

(2)构造标志:VMS 型矿床的形成与微板块(块体)岛弧火山岩浆活动密切相关,阿拉伯-努比亚地盾是由众多的微板块拼合而成。在微板块拼合过程中,由于挤压转换、岛弧间俯冲碰撞形成一系列缝合带构造,这些缝合带构造附近是断裂构造、岩浆侵入和古火山活动最发育的部位,也是该区域 VMS 型矿床以及其他类型矿床的成矿有利部位。

(3)地表铁帽标志:地表及浅层的原生 VMS 型矿体受长期风化和氧化作用在地表形成一层特征性氧化带(铁帽),可作为该地区该类矿床的直接找矿标志。

(4)蚀变标志:VMS 型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。

(5)化探标志:VMS 型矿床地球化学元素 Au、Pb、Cu、Zn、Ag、Ba 的组合异常,可作为该类矿床的找矿标志。

4 结论

(1)东北非努比亚地盾金矿形成于新元古代东、西冈瓦纳大陆挤压的构造背景下,主要矿床类型为造山型金矿和 VMS 型金矿。

(2)VMS 型火山成因块状硫化物金矿床,形成环境为岛弧裂谷或弧后裂谷环境。受韧性剪切带控制的造山型金矿床,形成于弧-弧碰撞造山阶段,与弧-弧碰撞缝合带展布方向一致的北东向韧性剪切带是造山型金矿的主要控矿构造。

(3)地层、构造、围岩蚀变、地表铁帽和化探等地质信息是造山型金矿和 VMS 型金矿直接的找矿标志。

(4)努比亚地盾金矿成矿地质条件优越,由于地

理条件的限制,以往的勘查和开采范围仍然有限,大量的空白区有待于进一步勘查,随着地球物理和地球化学等新技术和新方法的应用,找矿潜力大。

成都地质调查中心副主任李建星研究员和编辑对本文的修改和完善提出了修改意见,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] Fritz H, Abdelsalam M, Ali K A, Bingen B, Collins A S, Fowler A R, Ghebreab W, Hauzenberger C A, Johnson P R, Kusky T M, Macey P, Muhongo S, Stern R J, Viola G. 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.
- [2] Abdelsalam M G, Stern R J. Sutures and shear zones in the Arabian-Nubian Shield [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1997, 3:289-310.
- [3] Stern R J, Nielsen K C, Best E, Sultan M, Arvidson R E, Kroner A. Orientation of late Precambrian sutures in the Arabian-Nubian Shield [J]. *Geology*, 1990,18(11):1103-1106.
- [4] Stern R J, Kroner A. Late Precambrian crustal evolution in NE Sudan: Isotopic and geochronologic constraints [J]. *Journal of Geology*,1993, 101:555-574.
- [5] Abdelsalam M G, Stern R J. Sutures and shear zones in the Arabi-an-Nubian Shield [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1996, 23 (3) : 289 -310.
- [6] Miller M M, Dixon T H. Late Proterozoic evolution of the north part of the Hamisana zone, northeast Sudan: constraints on Pan-African accretionary tectonics [J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 149: 743-750.
- [7] Blasband B, White S, Brooijmans P, De Boorder H, Wissler W. Late Proterozoic extensional collapse in the Arabian-Nubian Shield [J]. *Journal of Geological Society*, 2000, 157:615-628.
- [8] Johnson P R, Andresen A, Collins A S, Fowler A R, Fritz H, Ghebreab W, Kusky T, Stern R J. 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 Sciences*, 2011, 61: 167-232.
- [9] Young G M. Are Neoproterozoic glacial deposits preserved on the margins of Laurentia related to the fragmentation of two supercontinents [J]. *Geology*, 1995, 23:153-156.
- [10] Eyal M, Litvinovsky B, Jahn B M, Zanzivilevich A, Katzir Y. Origin and evolution of post-collisional magmatism: coeval Neoproterozoic calc-alkaline and alkaline suites of the Sinai Peninsula [J]. *Chemical Geology*, 2010, 269: 153 -179.
- [11] Abdel-Rahman A M. Petrogenesis of anorogenic peralkaline granitic complexes from eastern Egypt [J]. *Mineralogical Magazine*, 2006, 70:27-50.
- [12] 胡金才,智铎强,胡建勇.苏丹哈马迪金矿南段地质、矿化特征及采矿意义 [J]. *地质调查与研究*,2013,(4): 295-298.
- [13] 杨士道,刘萍.苏丹哈马迪剪切带型金矿地质特征[J].*中国科技信息*,2009,(13):28-31.
- [14] 张晓飞,孙爱群,牛树银,张福祥,刘成,武玉璞.胶东焦家金矿田成矿构造及控矿作用分析 [J]. *黄金科学技术*, 2012,(3):19-22.
- [15] 李辉,胡建勇.苏丹哈马迪金矿地球化学特征及成因探讨[J].*地质找矿论丛*,2012,27(2):222-226.
- [16] La Mancha Resources Inc, Canada. Hadal Awatib East Cu-Au VMS deposit, Sudan [R].2009.
- [17] Barrie C T, Hannington M D. Volcanic-associated massive sulfide deposits: processes and examples in modern and ancient settings: Introduction [J]. *Reviews in Economic Geology*, 1999, 8:1-11.
- [18] 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: 717-738.