

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.01.004

东北非与中国胶东造山型金矿对比及对非洲找矿勘查的启示

曾国平, 向文帅*, 吴发富, 李福林, 王建雄, 胡鹏

ZENG Guoping, XIANG Wenshuai*, WU Fafu, LI Fulin, WANG Jianxiong, HU Peng

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

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

摘要:东北非是一个快速兴起的世界级金矿省,发育大量造山型金矿床。选择东北非努比亚地盾代表性造山型矿床进行总结梳理,认为区内金矿成矿可能受控于努比亚地盾地块拼贴后挤压/压扭向张扭剪切转换的过程,绿片岩相-角闪岩相变质基性火山岩是主要赋矿围岩,剪切带(断层)为主要控矿构造。通过对比,发现努比亚地盾矿集区与胶东矿集区类似,在大规模金成矿前均经历了洋壳俯冲过程,除赋矿围岩和成矿时代区别明显外,在控矿构造、矿化类型、矿物组合、成矿流体等方面较相似。结合控矿因素与找矿标志对比,针对努比亚地盾造山型金矿的找矿勘查提出具体建议:通过遥感和地质图修编圈定找矿远景区;利用地球化学测量和地质图草测等圈定找矿靶区;利用蚀变填图、反循环钻探,结合电磁测量,追踪隐伏矿体;通过矿床理论研究和矿田构造分析,支撑矿床(点)深部找矿。

关键词:东北非;努比亚地盾;造山型金矿;矿产勘查工程

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)01-0048-12

Zeng G P, Xiang W S, Wu F F, Li F L, Wang J X, Hu P. A comparison between orogenic gold deposits in Northeast Africa and Jiaodong, China and its implications for exploration in Africa. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 48-59

Abstract: The Nubian shield in the Northeast Africa is an emerging world-class gold province with numerous orogenic gold deposits. Based on the investigation of some representative orogenic gold deposits, the geological features related to the orogenic gold deposits in the Nubian shield were summarized. It is suggested that gold mineralization in this area might be formed during the transition from compression to tensional shear after block accretion of the Nubian shield, the greenschist-amphibolite facies metamorphic rocks are main host rock, and the shear zones (faults) are main ore-controlling structures. The orogenic gold deposits in the Nubian shield and Jiaodong in China underwent oceanic crust subduction before large-scale mineralization. Both are similar in ore-controlling structures, mineralization type, mineral assemblages and ore-forming fluids, except for the obvious differences of host rocks and metallogenic ages. Combined with the comparison of ore-controlling factors and prospecting indicators, some detailed suggestions for the orogenic gold deposits exploration in Nubia Shield are proposed as follows: remote sensing and geological mapping to outline potential area; geochemical and geological brief survey to target prospecting area; alteration mapping, reverse circulation drilling and electromagnetic survey to track hidden ore bodies; theoretical study and structural analysis to promote deep ore-prospecting.

Key words: Northeast Africa; Nubian shield; orogenic gold deposits; mineral exploration engineering

造山型金矿指在时间和空间上与增生造山或碰撞造山密切相关,产于汇聚板块边界,并受韧-脆

性断裂控制的脉型和浸染型金矿床系列^[1]。其中,前寒武纪形成的造山型金矿发育于绿岩带和被动

收稿日期:2020-12-30;修订日期:2021-11-16

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:曾国平(1990-),男,博士,助理研究员,从事矿床学研究。E-mail:1204929467@qq.com

*通信作者:向文帅(1990-),男,硕士,高级工程师,从事地质矿产勘查与研究。E-mail:oldwenzi@163.com

大陆边缘沉积岩系内^[2],如西澳 Yilgarn 克拉通 Golden Mile、津巴布韦克拉通 Kwekwe 和西非 Eburnean 造山带 Ashanti 金矿等^[3];显生宙形成的造山型金矿分布在大陆边缘和古特提斯洋盆周缘,如中亚造山带 Muruntau 金矿集区和中国华北胶东金矿集区等^[3]。造山型金矿通常品位高、规模大,是全球金矿勘查的重要类型,为世界提供了 30% 以上的黄金储量^[4]。目前探明的该类矿床金资源量仅占估算总量的 8% 左右,找矿前景巨大^[5]。

东北非努比亚地盾是一个快速兴起的世界级金矿省,金矿开采历史已超过 6000 年^[6-7],目前该地区有 11 个大型的现代化开采矿山^[8]。区内主要金矿类型为造山型(或韧性剪切带型)、VMS 型和浅部风化带型 3 种。造山型金矿在该地区具有重要的地位,不少中资企业(四川路桥、中国地质矿业有限责任公司、中色地科、上海外经、中閭矿业公司等)针对东北非的造山型金矿开展了地质勘查、找矿勘探及矿产开发活动。前人对区内个别造山型金矿的矿化特征^[9]、成矿流体^[10]及矿床成因^[11]进行了研究,但研究程度整体较低,且对区域地质背景、矿床地质特征、矿化特征、成矿时代与成矿机制、控矿因素与找矿标志等缺乏系统总结对比,限制了区内的矿产勘查和矿业投资。

造山型金矿为中国贡献了一半的金资源量,主要分布于胶东半岛、华北、秦岭、新疆北部、东南沿海等金富集区^[12]。其中,胶东半岛已经累计探明金资源储量逾 5000 t^[13],贡献了全国超过 25% 的金年产量和 30% 的金储量。虽然胶东半岛金矿的成因类型还存在较大争议,但其控矿构造特征、矿化类型、矿石和围岩蚀变组合、成矿流体化学特征等均与典型的造山型金矿床相似^[14]。经过长期的开采和科学研究,积累了海量科研资料,取得了重大找矿勘查突破,成为科学研究指导找矿勘查的典型案例^[15]。

本文对东北非努比亚地盾造山型金矿的研究现状进行了总结,并与胶东半岛的同类型金矿从区域地质背景、矿床地质特征、矿化特征、成矿机制、找矿标志等方面进行系统对比,以期对东北非努比亚地盾造山型金矿的找矿勘查和矿业投资提供科学依据。

1 东北非造山型金矿床

东北非努比亚地盾出露于埃及东南部、苏丹东

北部、厄立特里亚和埃塞俄比亚。努比亚地盾形成于新元古代泛非构造期东西冈瓦纳大陆的拼合作用(850~550 Ma),是冈瓦纳成矿域的重要组成部分^[16-17]。新元古代,努比亚地盾经历了复杂的构造演化历史^[18-19],形成一系列岩浆岩、剪切带和绿片岩相-角闪岩相变质岩,为区内 VMS 型铜金矿床与造山型金矿床的形成提供了有利条件。正在开采的造山型金矿床主要有埃及的 Sukari 和 Hamash,苏丹的 Hamadi、Qbgbi 和 Kamoeb,厄立特里亚的 Koka 及埃塞俄比亚的 Lega Dembi 和 Sakaro^[8](图 1)。

1.1 埃及东部沙漠造山型金矿床

埃及的东部沙漠位于努比亚地盾西北部,采金活动已经持续超过 6000 年,19 世纪以前主要开采砂金,产出约 25 t 金^[11, 20-21]。目前, Sukari 是区内主要正在开采的大型露天和高品位的地下矿山,由森塔明(Centamin)采矿公司与埃及政府的合资公司生产。露天采坑中探明的 Measured 和控制的 Indicated 矿石资源量达 386 Mt,平均品位 1.03 g/t, Au 401 t(12.9Moz),地下坑道中探明的和控制的矿石资源量达 4.67 Mt,平均品位 6.8 g/t, Au 31.7 t(1.02 Moz)。露天开采始于 2010 年,地下开采始于 2011 年,2012 年生产了 8.175 t 黄金^[20]。

区域性 NW 向 Najd 断层系在 640~570 Ma 经历了多期剪切过程,斜向穿过中东部沙漠,并控制了大部分造山型金矿床的分布,是区内最主要的赋矿构造。南东部沙漠 Allaqi-Sol Hamed 地块中活化的 EW 向逆冲断层也是重要的控矿构造^[20]。东部沙漠的造山型金矿主要表现为与剪切带中侵入体相关的石英脉。石英脉主要赋存于剪切带转折部位,脉体产出形态、分枝复合构造及石英结构均显示出同构造成因。金属矿物主要有黄铁矿、毒砂、(±)磁黄铁矿,以及少量黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和黝铜矿。蚀变矿物主要有云母、绿泥石、碳酸盐矿物。成矿流体通常为低盐度的含碳质流体,大部分矿化石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 8‰~15‰,伴生碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -10‰~-1‰,成矿有关硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -5‰~10‰,但单个矿床(点)的硫同位素值较均一。金通常在 250~370℃ 之间沉淀富集,主要取决于位置和压力。从 Fawakhir 和 Atalla 矿床获得的数据显示,至少部分金矿化形成于约 600 Ma^[22](图 2)。

1.2 苏丹造山型金矿床

苏丹东北部属于努比亚地盾区,区内金矿床

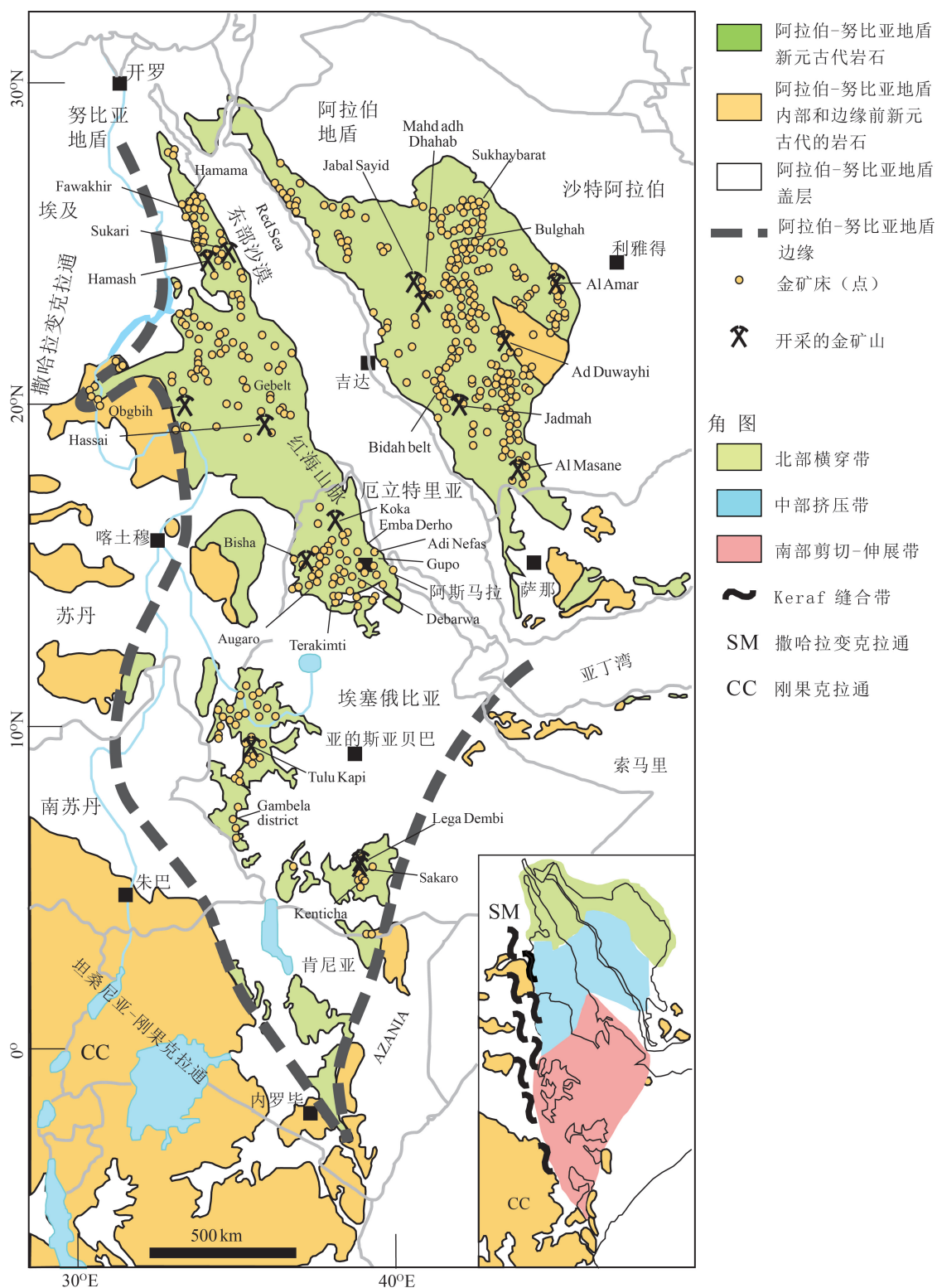


图 1 努比亚地盾、邻区金矿点及正在开采的矿山(据参考文献[8]修改)

Fig. 1 Gold occurrences and active mines in the Nubia Shield and adjacent areas

(点)星罗棋布,其中哈马迪(Hamadi)金矿地处苏丹尼罗州尼罗河西侧,是该区主要的金矿床之一。

1999 年苏丹地质局(GRAS)首次开展了金矿勘查, 2000 年法国科米罗(Cominor)公司探获了约 2 t 远

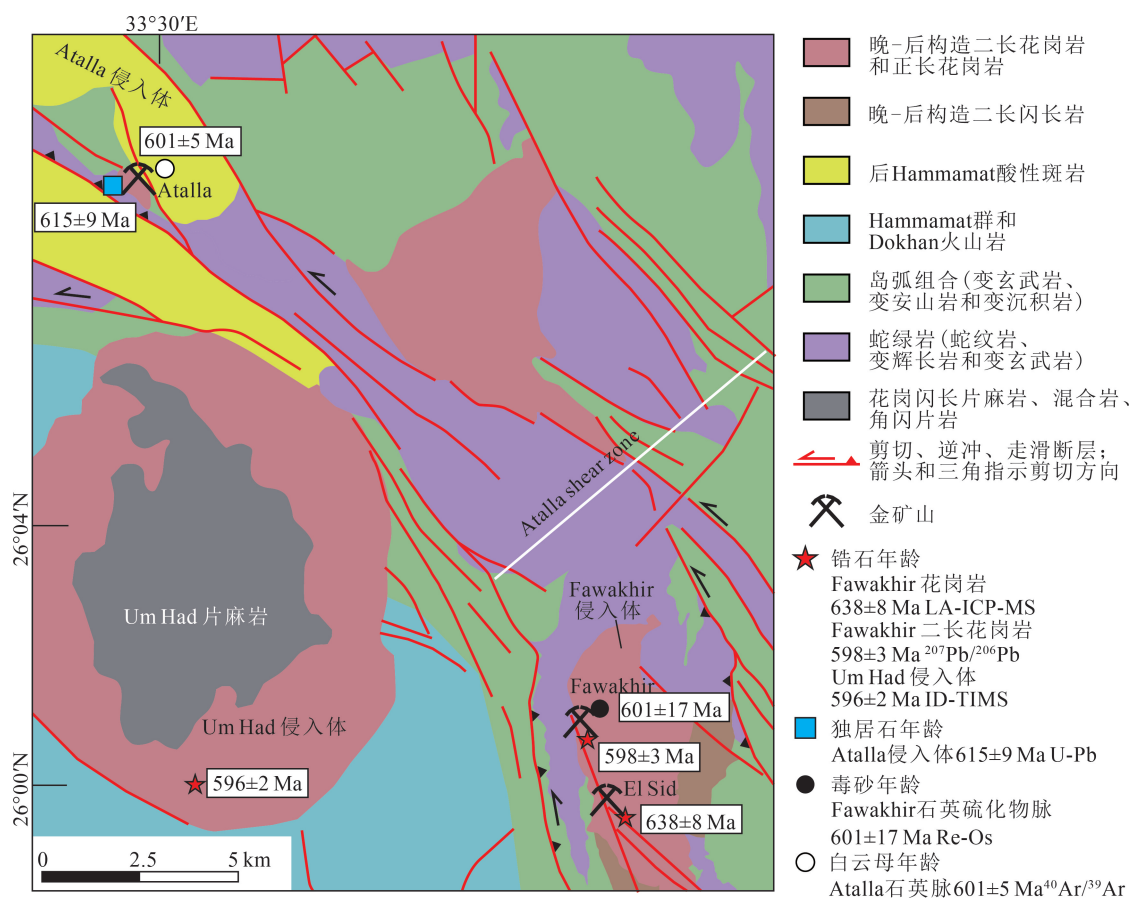


图 2 Fawakhir-Atalla 地区地质简图(据参考文献[20]修改)

Fig. 2 Simplified geological map of the Fawakhir-Atalla area

景金资源量,2006—2008 年,天津华勘有限公司探明 13 t 金资源量,预测远景金资源量 65 t^[23]。

矿区出露一套新元古界互层状片麻岩和片岩^[23-25]。构造主体表现为 NE 向哈马迪复式背斜,轴面倾向 NW,两翼片理、片麻理发育;断裂构造以近 SN 向、NE 向和 NW 向 3 组为主,近 SN 向断裂形成区内矿化蚀变带,规模大,是区内的导矿、容矿构造。

金矿体受哈马迪背形核部和两翼的片理化带及张性断裂、岩性等控制,主要呈层状、似层状、透镜状,产状大多与围岩一致,根据矿体特征可分为东、西 2 个矿段;西矿段为主矿段,产于 NE 向韧性变形域,为蚀变岩型,矿体长数百米至 2000 m,厚 2.5~7 m,总体走向 NE 向,倾向 NW,金平均品位 8.43×10^{-6} ;东矿段产于脆性变形域,为石英脉型,大脉厚 0.3~1 m,细脉形成囊状密集型矿体,厚 3~8 m,总体走向近 SN 向,倾向 W,金平均品位 2×10^{-6} ^[26](图 3)。

金主要是自然金,呈裂隙金和包裹金,以微粒和细粒金为主(0.01~0.40 mm),偶见大颗粒金(3 mm)^[23]。金属矿物为黄铁矿和白铁矿,少量磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等,次生氧化铁矿物为褐铁矿,偶见孔雀石;非金属矿物有石英、石榴子石、钠长石、绢云母等。黄铁矿、磁黄铁矿和石英是主要的载金矿物。矿石构造为浸染状构造、细脉状构造、块状构造等^[25]。硅化和黄铁绢英岩化与金矿化关系密切,绢英岩化与褐铁矿化伴生是有利的找矿标志。

成矿过程可大致划分为 3 期 4 个阶段:区域变质期为金的初始矿化期;动力变质成矿期的硫化物-细小石英脉阶段为主成矿阶段,沿主剪切面附近的网状裂隙形成烟灰色细脉浸染状黄铁矿、毒砂;岩浆热液期沿继承性破碎带形成黄绿色黄铁矿-毒砂脉或团块,仅零星分布,属于叠加成矿阶段^[24]。流体包裹体研究显示含矿石英细脉中包裹

体几乎 95% 以上为炭质流体包裹体,估算出捕获的最小温压条件为 280~360℃、80~320 MPa,低于绿片岩相的温压条件,指示金矿成矿发生于退变质作用晚期^[27]。矿床地球化学研究显示,金为后生成矿的产物; $\delta^{34}\text{S}$ 组成较均一,为 -4.6‰~-2.6‰; $\delta\text{D}_\text{V-SMOW}$ (-67.0‰~-49.0‰) 和 $\delta^{18}\text{O}_\text{V-SMOW}$ (+9.8‰~+11.1‰) 分布范围较窄,指示成矿流体主要为变质热液^[28]。

1.3 厄立特里亚造山型金矿床

厄立特里亚位于非洲东北部,努比亚地盾的南部,发育大量造山带型金矿床和 VMS 型铜金矿床,并主要分布于 NNW 向 Asmara-Nakfa 和 NNE 向 Augaro-Adobha 的 2 条铜金成矿带内。Koka 金矿是厄立特里亚研究程度较高的造山型金矿床。

Koka 金矿位于厄立特里亚西北部,受控于

Nakfa 地体和 Adobha Abiy 地体之间的 Elababu 剪切带,属于 NNE 向 Augaro-Adobha 铜金成矿带。该矿床的发现和开采最早可追溯至古埃及时期,现代的开采从 20 世纪早期意大利殖民时期开始,后因独立战争中止。1998 年 Sub-Sahara 公司开展了较系统的勘查工作,截至 2010 年,控制的金储量 840 000 盎司(约 26.13 t,平均品位 5~6 g/t),达大型规模,并具有较好的资源远景^[29-30]。

矿区东部和中部主要出露绿片岩相变质火山岩和变质火山沉积岩序列,并伴有后期构造花岗岩类产出,属于 Nakfa 地体;矿区西部主要出露变质玄武岩和变质沉积岩序列,伴有少量同构造花岗岩,属于 Adobha Abiy 地体。NNE—NE 向 Elababu 剪切带是矿区最重要的控矿构造,表现为向 E 倾的高

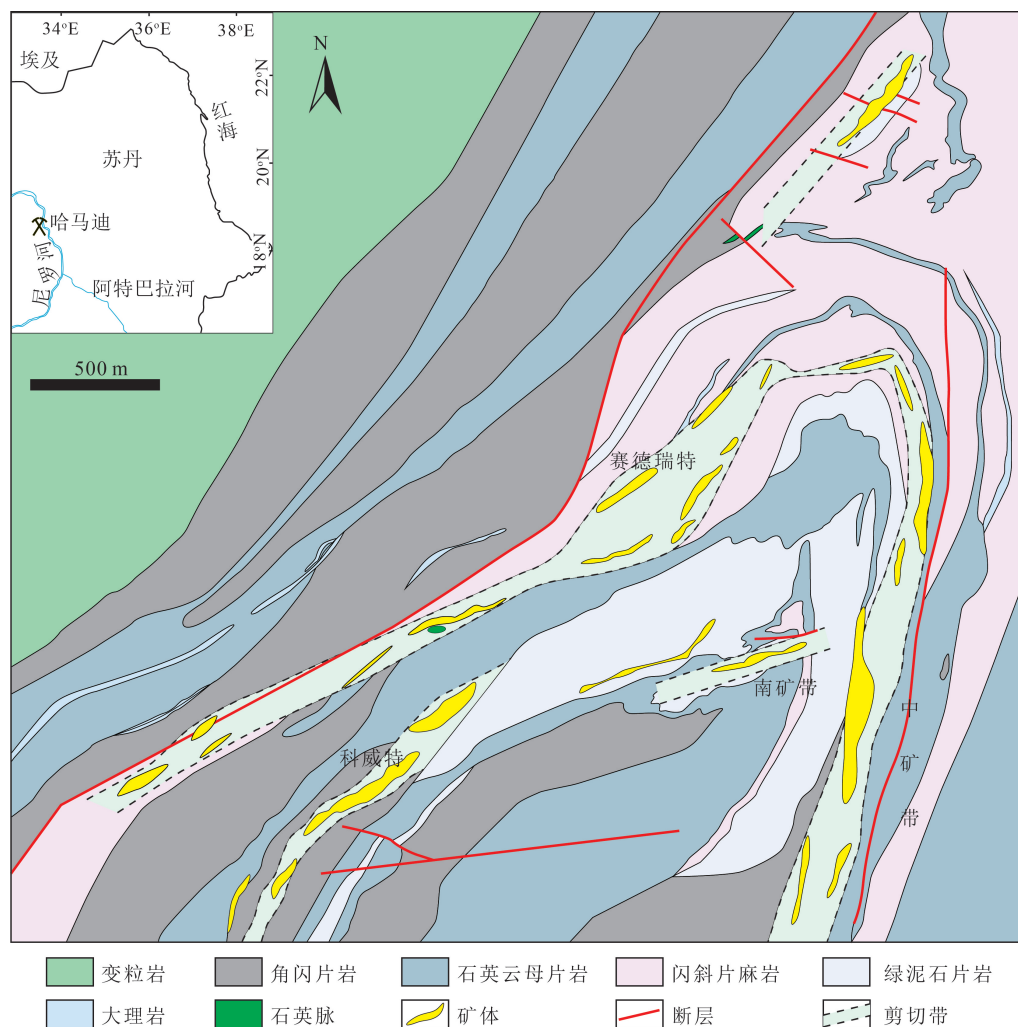


图 3 哈马迪金矿地质简图(据参考文献[28]修改)

Fig. 3 Simplified geological map of the Hamadi gold deposit

角度逆冲断层,并且在逆冲的 Nakfa 地体形成西翼短东翼长的不对称牵引背斜。

金矿体主要呈脉状、透镜状及不规则状,走向延伸超过 650 m,平均深度大于 165 m,主要为石英脉型和蚀变岩型,均与 NNE 向微晶花岗岩关系密切^[28]。石英脉型主要发育于微晶花岗岩体,呈网脉状切割岩体,延伸较短;蚀变岩型主要发育于岩体下盘与变质火山沉积岩陡立的接触带,宽 50~80 m,与石英网脉密切相伴;然而,在上盘接触带,矿化则非常分散。

含金石英脉为主要矿石类型,金属矿物主要为自然金、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿及少量闪锌矿,非金属矿物主要为石英、方解石和绢云母,载金矿物主要为方铅矿、石英等。硅化、黄铁矿化、绢云母化等与金矿化密切相关,并具有一定分带性:硅化与主矿化带一致,以硅化-黄铁矿蚀变带为特征;绢云母化与黄铁矿化分布于矿化带及外围,形成绢云母+黄铁矿蚀变晕。

流体包裹体研究显示,成矿流体为中低温、低盐度的 $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}(-\text{CH}_4)$ 体系,平均盐度为 5%,均一温度集中于 260~280℃,与方铅矿-闪锌矿矿物对计算的温度一致 ($265\pm 19^\circ\text{C}$),成矿压力约 168 MPa,换算成矿深度约为 6.3 km,流体不混溶可能是早阶段金富集沉淀的主要机制。 $\delta^{13}\text{C}$ ($-5.5\text{‰}\sim -4.4\text{‰}$)、 $\delta\text{D}_{\text{fluid}}$ ($-57.0\text{‰}\sim -50.1\text{‰}$) 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ ($+1.7\text{‰}\sim +2.7\text{‰}$) 指示成矿流体可能源自变质流体,并有岩浆流体混入;硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值非常接近 0‰,显示为岩浆源^[10]。金矿成矿时代为 600~580 Ma,形成于碰撞过程中挤压向伸展转换的构造环境^[11]。

1.4 埃塞俄比亚造山型金矿床

埃塞俄比亚的造山型金矿主要分布于北部、西南部 and 南部,南部 Adola 矿带的 Lega Dembi 金矿床的浅表矿金储量约 66 t,平均品位 3.7 g/t,坑道金储量约 11 t,平均品位 3.6 g/t,每年产金约 3.5 t(2015 年),是其境内研究程度最高、在产的大型造山型金矿^[8]。

Lega Dembi 金矿床位于 Megado 绿岩带东缘的剪切带中。地层为新元古代绿片岩相-角闪岩相变质的火山沉积岩序列,主要有黑云母-长石-石英片岩、炭质云母片岩、角闪岩和基性-超基性岩^[31-32](图 4)。

矿体赋存于变火山沉积岩序列,受韧性-脆韧性剪切带控制,呈平行面理的板状和透镜状,走向为 SN 向,陡立倾向 W。金矿化发育于沿韧性、脆韧性和脆性剪切带分布的石英豆荚、石英脉和大量石英细脉、网脉及由硅化、硫化围岩胶结的石英角砾中^[33]。单条石英脉宽几厘米至 3 m,走向和倾向延伸达数百米,石英脉和矿化蚀变的围岩主要富集于长约 1000 m、宽约 100 m 的区域内。尽管金在剪切带和蚀变带均有富集,但高品位金大部分位于石英脉和细脉中,金品位为 3~4 g/t,角砾和网脉带由大量随机定向的石英脉和角砾组成,也有一些高品位的金矿化,低品位金发育于蚀变围岩中^[33]。

金主要呈自然金和银金矿(Ag 含量 20%~55%)产出。矿石矿物主要有硫化物(磁黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、黄铁矿、毒砂等)、碲化物(碲铅矿、碲银矿、碲金银矿)、硫酸盐及少量方黄铜矿、黝铜矿和四方硫铁矿^[34];脉石矿物主要有石英、碳酸盐矿物和硅酸盐矿物。金和银金矿呈孤立颗粒、金块、树枝状集合体分布于石英内,或呈液滴状产于方铅矿内。金与方铅矿、碲化物等低温矿物伴生指示其成矿环境可能为低温的退变质环境。

2 东北非与中国的矿床对比

2.1 区域地质背景

东北非努比亚地盾是冈瓦纳成矿域的重要组成部分,在新元古代经历了莫桑比克洋盆形成、洋壳俯冲、碰撞造山和后造山坍塌的构造演化历史^[18-19]。在此期间,区内形成了岩浆岩、剪切带和绿片岩相-角闪岩相变质基性火山岩。岛弧拼贴增生结束后,经历了从挤压/压扭性向拼合后的张扭剪切的转换过程,为金成矿提供了有利条件。努比亚地盾可划分为 3 个构造分区:南努比亚地盾以 SN 向剪切带(如 Elababu 剪切带)和绿岩带为代表;中努比亚地盾主要为 Oko、Hamisana 剪切带和同期的 Keraf 缝合带;北努比亚地盾以 NW 向 Najd 断层系为主。这些剪切带和断层是区内主要的控矿构造,控制着区内造山型金矿的空间分布,并且剪切带的变形程度和发育规模与金矿床的规模呈正相关关系。

胶东金矿集区大部分金矿床产于胶东半岛西北部的胶北地块。胶北地块下伏太古宙-古元古代胶东群结晶基底^[35],其上不整合覆盖古元古代的

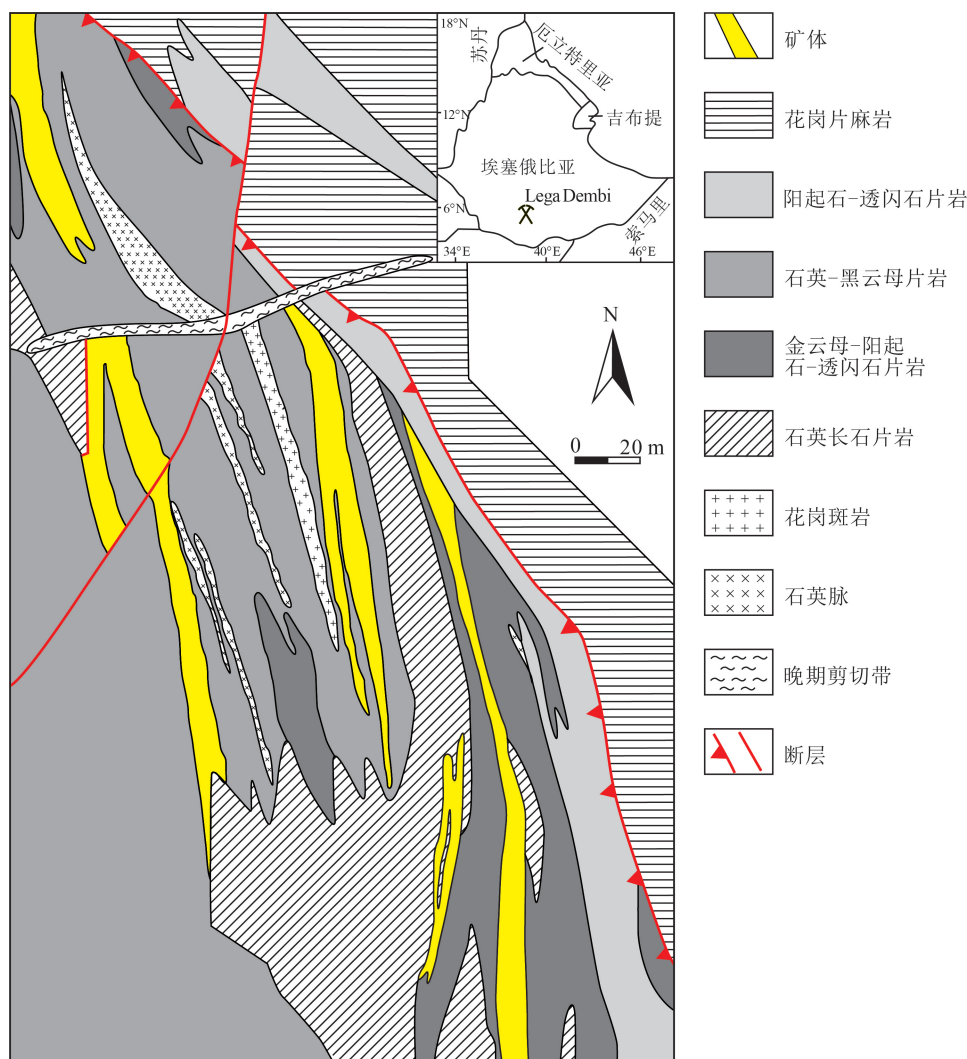


图 4 Lega Dembi 金矿床地质简图(据参考文献[33]修改)

Fig. 4 Simplified geological map of the Lega Dembi deposit

超基性岩、麻粒岩相-角闪岩相变质岩。2.5 Ga 和 1.8 Ga 的变形变质作用使早期岩石克拉通化。中生代,古太平洋板块俯冲引起华北克拉通根部侵蚀、岩石圈不均一破坏等^[36-37]。早白垩世的陆内造山运动使区内由挤压构造体制转变为伸展构造体制^[38-40],NNE—NE 向断裂带控制了主要金矿化。侵入岩主要为玲珑岩体和郭家岭岩体^[41-42]。前者为 165~150 Ma 中粗粒、等粒状到斑状花岗岩和花岗闪长岩,形成一系列 NNE—NE 向的岩基状侵入杂岩体,经变形作用改造,边缘发育片麻状构造。后者为 130~123 Ma 斑状角闪黑云花岗闪长岩,侵入于玲珑岩体西北部和北部边缘,深度 5~13 km。区内大部分金矿化赋存于玲珑岩体,少量矿化赋存

于招莱成矿带的郭家岭岩体^[14]。

努比亚地盾与胶东有不同的大地构造演化过程,但是它们在大规模金成矿前均经历了洋壳俯冲过程。其中,努比亚地盾为新元古代的莫桑比克洋俯冲,胶东为中生代的古太平洋俯冲。这种洋壳俯冲过程也被认为是统一解释全球造山型金矿成矿作用的关键过程^[43]。这 2 个矿集区的金成矿可能都受控于挤压向伸展/张扭剪切的转换过程,显示出控矿机制的一致性。当然,两者金矿的赋矿围岩存在区别,努比亚地盾的赋矿围岩主要为绿片岩相-角闪岩相变质基性火山岩,胶东的赋矿围岩主要为中生代岩浆岩和古元古代高角闪岩相和麻粒岩相变质岩,但这种赋矿围岩的区别主要为不同地

区的特色,并不影响其是否为造山型金矿的判断^[43]。

2.2 矿床地质特征

努比亚地盾的造山型金矿床主要受区内剪切带和断层控制。控矿剪切带和断层大体可分为 3 组:南努比亚地盾金矿的控矿构造主要表现为 SN 向(如 Elababu 剪切带),中努比亚地盾金矿的控矿构造主要表现为 NE—NNE 向(如 NE 向 Oko、Hamisana 剪切带和 NEE 向 Keraf 缝合带),北努比亚地盾金矿的控矿构造主要表现为 NW 向。一些次级断层或剪切带也是局部矿化的重要控矿构造。矿区出露地层主要为新元古代绿片岩相-角闪岩相变质基性火山岩和变质火山沉积岩序列,部分矿区伴有后期构造花岗岩类产出。其中,绿片岩相-角闪岩相变质基性火山岩是主要的赋矿围岩。地层空间分布受区域性剪切带控制作用明显:南努比亚地盾呈 SN 向展布,中努比亚地盾主要呈 NE—NNE 向展布,北努比亚地盾主要呈 NW 向展布。

胶东金矿集区出露的地质单元主要为古元古代高角闪岩相-麻粒岩相变质岩和中生代岩浆岩,它们也是区内主要的赋矿围岩。胶东金矿床主要受 NE—NNE 向断层控制,特别是招莱成矿带的金矿床,主要沿侵入体边缘及不同侵入体之间的 NE—NNE 向断裂构造分布。许多矿床明显产于这些断裂构造的局部膨大部位,指示断裂带的膨大和流体迁移聚集对金成矿的控制^[44]。前人研究认为,这些 NNE—NE 向断层可能是区域性郯庐断裂带的次级断层,而郯庐断裂带深切至地幔,被认为可能是熔体和流体迁移的主要通道^[45]。

努比亚地盾造山型金矿与胶东矿集区金矿床的赋矿围岩均为前寒武纪变质岩,矿化受剪切带控制,并均与侵入岩存在一定联系。但两者矿床的地质特征也有各自的地区特色:①胶东矿集区的赋矿围岩变质程度更高;②胶东矿集区的剪切带走向较统一,主要为 NE—NNE 向,而努比亚地盾区的剪切带可划分为 3 组;③胶东矿集区的侵入岩与围岩时代相差较大(>2 Ga)^[14],而努比亚地盾的侵入岩与围岩的时代相差不大,均为新元古代。

2.3 矿化特征

努比亚地盾造山型金矿的矿体可分为石英脉型和蚀变岩型。含矿石英脉受脆韧性剪切带控制,主要赋存于剪切带转折部位,或伴生的褶皱核部及两翼,主要呈脉状、透镜状及不规则状,走向延伸几

百米,平均深度上百米。部分金矿区的脉体产出形态、分枝复合构造及石英结构均显示出同构造成因。蚀变岩型主要受韧性变形域控制,发育于侵入岩与变质火山岩接触带,与石英网脉密切相伴。通常蚀变岩型矿化比石英脉型更宽,矿化更均匀。尽管金在剪切带和蚀变带均有富集,但高品位矿石($3\sim 4$ g/t)大部分发育于石英脉和细脉,角砾岩和石英网脉带中也有一些高品位的金矿化,低品位矿石则发育于蚀变围岩中。

金主要是自然金,部分矿床含银金矿(Ag 含量 20%~55%)及少量碲金银矿等。金主要呈裂隙金和包裹金,以微粒和细粒金为主($0.01\sim 0.40$ mm),偶见大颗粒金(3 mm)。黄铁矿是主要的金属硫化物,此外,白铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿等硫化物也较常见,部分矿床可见碲化物(碲铅矿、碲银矿、碲金银矿)、硫酸盐等,金与方铅矿、碲化物等低温矿物伴生,指示其成矿环境可能为低温环境。非金属矿物以石英、绢云母和碳酸盐为主,部分矿床可见石榴子石、钠长石等。矿石构造有浸染状构造、细脉状构造、块状构造等。硅化、黄铁矿化、绢云母化等与金矿化密切相关,并具有一定分带性:硅化与主矿化带一致,以硅化-黄铁矿化蚀变带为特征;绢云母化与黄铁矿化分布于矿化带及外围,形成绢云母+黄铁矿蚀变晕。

胶东金矿化主要分为玲珑型和焦家型 2 种,前者的典型特征是发育大的石英脉,后者则表现为花岗岩碎裂带中的网脉和浸染状围岩。矿带走向和倾向延伸几百米至 2 km,宽达几十米。2 种矿化通常是渐变的,并可在同一矿床内同时出现。玲珑型含金石英脉常表现为角砾化和裂隙化,更多地出现在矿带倾角较陡的部位($\geq 60^\circ$)。控矿断裂走向变化的部位是矿体就位的关键部位,如三山岛-苍山断层带和牟平-乳山成矿带。焦家型矿化通常表现为花岗岩类赋矿围岩的强烈硫化,而不是玲珑型的石英脉。随着金价格的上涨,更多的矿化蚀变被划入矿体部分^[11]。

金主要赋存于黄铁矿和石英的裂隙,与细粒黄铁矿伴生,细粒黄铁矿通常表现为高品位,而粗粒黄铁矿的金品位较低。金、银金矿、碲金银矿^[13]、自然银、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和磁黄铁矿是矿石中常见的矿石矿物,其中黄铁矿是最常见的硫化物。尽管一些矿床中 As 的浓度可以达到 $2500\times$

10^{-6} ,但毒砂较少见。另外,少量的白铁矿、赤铁矿、磁铁矿、硫盐矿物、重晶石等也见报道。部分矿床发育含碲和铋的矿物。通常认为,成矿早阶段为大量黄铁矿的沉淀,随后是金和贱金属的沉淀,但这种现象也可能反映成矿后的构造变形导致金活化进入黄铁矿的裂隙^[14]。

努比亚地盾的造山型金矿床与胶东矿集区的金矿都存在石英脉型和蚀变岩型 2 种矿化类型。但两者的区别在于,目前努比亚地盾的勘查发现以石英脉型为主,蚀变岩型矿化规模不大;而胶东矿集区的蚀变岩型矿化规模远超过石英脉型。在矿物组合方面,2 个矿集区的表现较接近,金主要为自然金、银金矿及少量碲金银矿,都以黄铁矿为主要硫化物,同时发育黄铜矿、闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿等,部分矿床发育含碲的矿物。胶东矿集区金矿床中自然银的存在,可能指示胶东矿集区的金矿具有更高的 Ag/Au 值。

2.4 成矿机制与成矿时代

努比亚地盾造山型金矿的成矿流体多表现为中低温、低盐度的 $\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}(-\text{CH}_4)$ 体系,平均盐度为 5%,成矿流体温度变化范围较大,为 $250\sim 370^\circ\text{C}$,与 Koka 金矿床中方铅矿-闪锌矿矿物对估算的温度较吻合($265\pm 19^\circ\text{C}$),由矿物对和流体包裹体估算的成矿流体压力范围为 $80\sim 320\text{ MPa}$;矿化石英脉的 $\delta\text{D}_{\text{fluid}}$ 值为 $-67.0\text{‰}\sim -49.0\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $+1.7\text{‰}\sim +15\text{‰}$,伴生碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-10\text{‰}\sim -1\text{‰}$,指示成矿流体可能源自变质流体,并有岩浆流体混入,流体不混溶可能是早阶段金富集沉淀的主要机制。成矿有关硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-5\text{‰}\sim +10\text{‰}$,但单个矿床(点)的硫同位素值较均一,如 Koka 金矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值非常接近 0‰ ,显示为岩浆源。东北非努比亚地盾造山型金矿的成矿时代还没有得到很好地限制。根据与金矿化相关的剪切和岩浆活动事件可大致推断其成矿时代,但这些结果不够精确。Fawakhir 矿床中毒砂和石英的 Re-Os 等时线年龄为 $601\pm 17\text{ Ma}$,最有可能代表成矿年龄,该年龄与剪切构造推断的年龄相符,也与赋矿侵入体的 U-Pb 锆石年龄($598\pm 3\text{ Ma}$)吻合。金矿可能形成于碰撞过程中挤压向伸展转换的构造环境。

胶东矿集区 2 种矿化类型的成矿流体没有明显区别,大部分金矿床的成矿流体为 $250\sim 350^\circ\text{C}$ ^[46-47],中低盐度($6\%\sim 14\%\text{ NaCl equiv.}$)的 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 流体体

系^[48]。据估算,成矿流体的捕获压力为 $0.7\sim 2.5\text{ kbar}$,变化范围较大,指示至少部分石英和金属沉积与岩石破裂过程中压力的波动变化有关^[14]。

胶东金矿矿集区含金石英脉的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{waters}}$ 值为 $-5.4\text{‰}\sim +5.6\text{‰}$ ^[48-51], $\delta\text{D}_{\text{waters}}$ 值为 $-100\text{‰}\sim -30\text{‰}$ ^[41],氦和氩同位素分析指示其成矿流体可能为幔源流体^[52-54]。硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+3\text{‰}\sim +14\text{‰}$ ^[46, 48],明显偏高,与简单的幔源硫不一致。

随着测试方法的发展进步,许多研究者获得了胶东矿集区金成矿相关的云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄^[45, 55-56],结合野外宏观地质证据^[15]、煌斑岩脉年龄^[57-58]等,区内金矿的成矿时代被限定为 $120\pm 2\text{ Ma}$ ^[13]。区内侵入岩体可能为金成矿提供了合适的温压条件,促进了成矿流体的有效运移,导致了强烈的角砾岩化、蚀变及石英脉型和蚀变岩型矿化的形成^[13]。

综合对比,努比亚地盾区金矿与胶东矿集区金矿的成矿流体特征较相似,均为中低温、中低盐度的 $\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 流体体系。但努比亚地盾区金矿的成矿流体主要为变质流体,成矿物质更接近岩浆源,可能与赋矿围岩多为岩浆岩有关;而胶东矿集区金矿的成矿流体可能为幔源流体,但成矿物质与简单的岩浆源不一致。成矿时代方面,两者差别也较大:努比亚地盾区金矿的成矿时代更老(约 600 Ma),而胶东矿集区金矿的成矿时代较年轻($120\pm 2\text{ Ma}$)。

2.5 控矿因素与找矿标志

努比亚地盾造山型金矿的控矿因素主要分为 3 类:地层岩性、构造和岩浆岩。①地层岩石对成矿的专属性:绿岩带及其中的中-基性变质火山岩对金的成矿具有明显的控制作用,大多数脉状金矿床的赋矿围岩为变质镁铁质火山岩系。②构造也是区内金矿床形成的关键控矿因素,具有多级构造分级控矿的特点:韧性剪切带是区内造山型金矿的主要控矿构造,金矿体常产于韧性剪切带构造产状在空间上的变化部位,韧性剪切带的韧性域内产出蚀变岩型矿化,脆性域内则产出石英脉型矿化;次一级的断裂构造、层间滑脱构造和片理化构造,对金矿体控制作用明显。③努比亚地盾造山型金矿的部分成矿物质来源于岩浆岩,即岩浆活动为成矿提供了热源和成矿物质,或对原矿体产生热液叠加改造作用,使金矿进一步富集,这与胶东的造山型金矿床相似^[13, 43]。

努比亚地盾造山型金矿的找矿标志主要包括

围岩蚀变、地球化学异常和遥感信息。区内热液蚀变十分发育,硅化和黄铁绢英岩化与金矿化关系密切,这2种蚀变的伴生是有利的找矿标志。区内最有利的化探元素异常组合为Au、Ag、Cu、Pb、As元素组合,是有利的地球化学标志。由于矿化蚀变和岩石的构造形变,控矿剪切带在遥感影像上表现为线性构造,是很好的识别标志。含铁和含羟基矿物异常是遥感间接找矿的重要标志。

胶东矿集区金矿的控矿因素以构造为主,对地层岩性和岩浆岩没有特定的选择。三山岛断裂、焦家断裂等NNE向区域性大断裂既是导矿构造又是储矿构造,控制了主要成矿带和大型矿床的产出。不同岩体接触带,岩体与围岩接触带是剪切带发育的有利部位,这些剪切带成为控制金矿体的主要构造。控制金矿的断裂构造不是呈直线式向深部延展,而是呈现倾角陡、缓相间阶梯式特征,金矿主要沿倾角较缓的台阶分布^[15]。

大量实践证实,黄铁绢英岩化蚀变是胶东矿集区重要的找矿标志^[59-60]。蚀变岩型金矿的地球物理找矿标志是低磁、低阻、高极化率异常,而石英脉型金矿的地球物理找矿标志是低磁、高阻、高极化率异常^[61-62]。Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi等是区内金矿勘查的主要指示元素,并具有水平和轴向分带性^[61]。

由此可见,努比亚地盾的造山型金矿与胶东矿集区的金矿在控矿因素和找矿标志方面也存在相似性:剪切带(断裂)构造是重要的控矿因素;黄铁绢英岩化及Au、Ag、Cu、Pb、As等地球化学元素组合是重要的找矿标志。

3 找矿勘查指示意义

通过区域地质背景、矿床地质特征、矿化特征、成矿机制与成矿时代、控矿因素与找矿标志等方面的对比,可以看出努比亚地盾的造山型金矿与胶东矿集区的金矿存在较多相似点,当然也有各自的特点。胶东矿集区以地质变量类比和构造岩相界面成矿为主要标志圈定预测远景区,利用系统拉网式大比例尺(1:5000~1:50000)高精度电、磁、重和构造地球化学测量圈定主要成矿带的找矿靶区,以及基于地、物、化和钻探资料大数据处理的三维立体建模推断主要矿区(床)预测矿体位置、形态、产状等找矿预测方法^[15],对努比亚地盾的造山型金矿

找矿勘查具有较大的借鉴意义。基于胶东矿集区大比例尺(1:25000)成矿预测和三维定位在主要成矿构造带上预测圈定靶区,根据高精度精细地球物理探测确定赋矿断裂带延深和深部产状变化,依据构造地球化学测量预测深部成矿的可能性,按照阶梯式成矿模式选择断裂由陡变缓区段布置钻探验证的找矿模式^[15]。结合努比亚地盾自然地理条件 and 政治经济特点,笔者认为,可以通过遥感解译和信息提取判别岩体、剪切带并识别岩石蚀变区等信息,结合区域地质图修编,快速圈定有利找矿远景区;针对找矿远景区,通过地球化学测量和地质图草测等,利用地球化学、构造、蚀变等圈定有利找矿靶区;针对找矿靶区,以蚀变填图为先导,辅以反循环钻探,结合少量电磁测量,追踪隐伏矿体;针对已知矿床(点),应该加强矿床理论研究和矿田构造分析,总结构造控矿模式。

4 结 论

(1)努比亚地盾与胶东大规模金成矿前均经历了洋壳俯冲过程,且金成矿可能都受控于挤压向伸展/张扭剪切的转换过程。但两者赋矿围岩不同,努比亚地盾为绿片岩相-角闪岩相变质基性火山岩,胶东为中生代岩浆岩和古元古代高角闪岩相和麻粒岩相变质岩。

(2)努比亚地盾与胶东矿集区的矿化受剪切带控制,且均与侵入岩有关,矿化类型、矿物组合、成矿流体等方面也较相似,而成矿时代差别较大;努比亚地盾区为新元古代(约600 Ma),胶东矿集区为早白垩世(120±2 Ma)。

(3)努比亚地盾与胶东矿集区在控矿因素和找矿标志存在共同点:剪切带(断裂)构造是重要的控矿因素;黄铁绢英岩化及Au、Ag、Cu、Pb、As等地球化学元素组合是重要的找矿标志。

(4)对于努比亚地盾区的造山型金矿,可以利用遥感和地质图修编快速圈定有利找矿远景区,利用地球化学测量、地质图草测等圈定有利找矿靶区,通过蚀变填图、反循环钻探,结合电磁测量,追踪隐伏矿体,利用矿床理论研究和矿田构造分析,支撑矿床(点)深部找矿。

致谢:本文是在前人工作基础上的总结研究,谨向所有从事相关研究的作者致以衷心感谢,不足之处敬请各位同行批评指正。感谢审稿专家提出

的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, et al. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13(1/5): 7-27.
- [2] 王庆飞, 邓军, 赵鹤森, 等. 造山型金矿研究进展: 兼论中国造山型金成矿作用[J]. *地球科学*, 2019, 44(6): 2155-2186.
- [3] Goldfarb R J, Groves D I, Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a global synthesis[J]. *Ore geology reviews*, 2001, 18(1): 1-75.
- [4] Frimmel H E. Earth's continental crustal gold endowment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 267(1/2): 45-55.
- [5] Wilkinson B H, Kesler S E. Tectonic-Diffusion Estimate of Orogenic Gold Resources[J]. *Economic Geology*, 2010, 105(7): 1321-1334.
- [6] Klemm D, Klemm R, Murr A. Gold of the Pharaohs-6000 years of gold mining in Egypt and Nubia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2001, 33(3): 643-659.
- [7] Rosemarie K, Dietrich K. Gold and Gold Mining in Ancient Egypt and Nubia[M]. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2013: 1-341.
- [8] 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): 61-74.
- [9] Jelenc D. Mineral occurrences of Ethiopia[M]. Addis Ababa: Ministry of Mines, 1966: 1-720.
- [10] 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, (6): 1337-1348.
- [11] Zhao K, Yao H Z, Wang J X, et al. Genesis of the Koka Gold Deposit in Northwest Eritrea, NE Africa: Constraints from Fluid Inclusions and C-H-O-S Isotopes[J]. *Minerals*, 2019, 9(4): 201.
- [12] Zhou T H, Goldfarb R J, Phillips G N. Tectonics and distribution of gold deposits in China—an overview[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37: 249-282.
- [13] Zhang L, Weinberg R F, Yang L Q, et al. Mesozoic Orogenic Gold Mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: A Focused Event at 120 ± 2 Ma During Cooling of Pregold Granite Intrusions [J]. *Economic Geology*, 2020, 115(2): 415-441.
- [14] Goldfarb R J, Santosh M. The dilemma of the Jiaodong gold deposits: Are they unique? [J]. *Geoscience Frontiers*, 2014, 5(2): 139-153.
- [15] 宋明春. 胶东金矿深部找矿主要成果和关键理论技术进展[J]. *地质通报*, 2015, 34(9): 1758-1771.
- [16] Kroner A, Eyal M, Eyal Y. Early Pan-African evolution of the basement around Elat, Israel, and the Sinai Peninsula revealed by single-zircon evaporation dating, and implications for crustal accretion rates[J]. *Geology (Boulder)*, 1990, 18(6): 545-548.
- [17] 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.
- [18] 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(1): 45-65.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zoheir B, Feigenson M, Zi J, et al. Ediacaran (~ 600 Ma) orogenic gold in Egypt: age of the Atalla gold mineralization and its geological significance[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(7): 779-794.
- [22] Zoheir B, Zoheir B, Emam A, et al. Trace elements and isotope data of the Um Garayat gold deposit, Wadi Allaqi district, Egypt [J]. *Mineralium Deposita*, 2019, 54(1): 101-116.
- [23] 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): 29-31.
- [24] 赵鹏, 曲为贵, 刘建权, 等. 苏丹共和国哈马迪金矿成矿规律及成矿作用[J]. *新疆有色金属*, 2018, (5): 1-4.
- [25] 胡建勇, 杨伦, 李辉, 等. 苏丹东北部金矿成矿特征及成矿远景浅析[J]. *地质与勘探*, 2011, (3): 505-511.
- [26] 雷义均, 王建雄, 姚华舟, 等. 东北非努比亚地盾金矿成矿地质特征与找矿标志[J]. *华南地质与矿产*, 2019, (1): 90-98.
- [27] 徐九华, 王建雄, 向鹏, 等. 极富 CO_2 流体的造山型金矿: 苏丹哈马迪金矿[J]. *岩石学报*, 2015, (4): 1040-1048.
- [28] 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, (2): 222-226.
- [29] Dean C, David L, David G. Technical report on the Koka gold project, Eritrea[M]. Chalice Gold Mines Limited, 2010: 111.
- [30] 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.
- [31] Ghebreab W, Yohannes E, Giorgis L W. The Lega Dembi gold mine: an example of shear zone-hosted mineralization in the Adola greenstone belt, Southern Ethiopia [J]. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 1992, 15(3): 489-500.
- [32] Billay A Y, Kisters A F M, Meyer F M, et al. The geology of the Lega Dembi gold deposit, southern Ethiopia: implications for Pan-African gold exploration[J]. *Mineralium Deposita*, 1997, 32(5): 491-504.
- [33] Tadesse S. Genesis of the Shear Zone-related Gold Vein Mineralization of the Lega Dembi Gold Deposit, Adola Gold Field, Southern Ethiopia[J]. *Gondwana Research*, 2004, 7(2): 481-488.
- [34] Tadesse S. Geology and Gold Mineralization in the Pan-African Rocks of the Adola Area, Southern Ethiopia[J]. *Gondwana Research*, 1999, 2(3): 439-447.
- [35] Jahn B M, Liu D, Wan Y, et al. Archean crustal evolution of the Jiaodong Peninsula, China, as revealed by zircon SHRIMP geochronology, elemental and Nd-isotope geochemistry[J]. *American Journal of Science*, 2008, 308: 232-269.
- [36] Zhai M, Santosh M. Metallogeny of the North China Craton: Link

- with secular changes in the evolving Earth[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(1): 275–297.
- [37] Zhai M, Santosh M. The early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. *Gondwana Research*, 2011, 20(1): 6–25.
- [38] Davis G A, Darby B J. Early Cretaceous overprinting of the Mesozoic Daqing Shan fold-and-thrust belt by the Hohhot metamorphic core complex, Inner Mongolia, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2010, 1(1): 1–20.
- [39] Zhai M, Zhu R, Liu J, et al. Time range of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China Block[J]. *Science in China, Series D, Earth Sciences*, 2004, 47(2): 151–159.
- [40] 宋英听, 宋明春, 孙伟清, 等. 胶东金矿成矿时代及区域地壳演化——基性脉岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(5): 908–919.
- [41] Zhou T, Lü G. Tectonics, granitoids and mesozoic gold deposits in East Shandong, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2000, 16(1): 71–90.
- [42] Yang K F, Fan H R, Santosh M, et al. Reactivation of the Archean lower crust: implications for zircon geochronology, elemental and Sr–Nd–Hf isotopic geochemistry of late Mesozoic granitoids from northwestern Jiaodong Terrane, the North China Craton[J]. *Lithos*, 2012, 146/147: 112–127.
- [43] Groves D I, Santosh M, Deng J, et al. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration [J]. *Mineralium Deposita*, 2020, 55(2): 275–292.
- [44] 张宝林, 吕古贤, 余建国, 等. 胶东玲珑金矿田不同矿段构造变形岩相带特征与深部找矿预测[J]. *地质通报*, 2020, 39(11): 1681–1691.
- [45] Guo P, Santosh M, Li S. Geodynamics of gold metallogeny in the Shandong Province, NE China: An integrated geological, geophysical and geochemical perspective[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(3/4): 1172–1202.
- [46] Yao Y, Robb L J, Anhaeusser, C R et al. Mesozoic Gold Deposits in the Eastern Shandong Peninsula, P. R. China—Preliminary Geology, Geochemistry and Fluid Inclusion Investigations[C]//University of Witwatersrand, Economic Geology Research Institute Information Circular, 2002, 361: 11.
- [47] Fan H R, Hu F F, Yang J H, et al. Fluid evolution and large-scale gold metallogeny during Mesozoic tectonic transition in the Jiaodong Peninsula, eastern China [J]. *Geological Society London Special Publications*, 2008, 280(1): 303–316.
- [48] Qiu Y, Groves D I, Mcnaughton N J, et al. Nature, age, and tectonic setting of granitoid-hosted, orogenic gold deposits of the Jiaodong Peninsula, eastern North China craton, China[J]. *Mineralium Deposita*, 2002, 37(3): 283–305.
- [49] 李杰, 张丽鹏, 宋明春, 等. 胶东水旺庄金矿床成矿机制: 来自 S–H–O 同位素和流体包裹体的制约[J]. *地球科学*, 2021, 46(5): 1569–1584.
- [50] 王勇军, 刘颜, 黄鑫, 等. 胶东牟乳成矿带范家庄金矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2020, 50(4): 1012–1028.
- [51] 蔡亚春, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 胶东胡八庄金矿成矿流体、稳定同位素及成矿时代研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1341–1351.
- [52] Zhang L C, Zhou X H, Ding S J. Mantle-derived fluids involved in largescale gold mineralization, Jiaodong District, China: constraints provided by the He–Ar and He–O isotopic systems[J]. *International Geology Review*, 2008, 50: 472–482.
- [53] 卢圣祥. 基于胶东金矿成矿流体 He–Ar 同位素地球化学特征研究[J]. *世界有色金属*, 2020, (5): 227–228.
- [54] 毛光周, 何铁良, 许庆林, 等. 山东胶东地区盘子洞金矿成矿流体 He–Ar 同位素地球化学特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2020, 42(2): 188–198.
- [55] Li Q, Chen F, Yang J, et al. Single grain pyrite Rb–Sr dating of the Linglong gold deposit, eastern China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 34(3): 263–270.
- [56] Yang L Q, Deng J, Goldfarb R J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the formation of the Dayingezhuang gold deposit: new implications for timing and duration of hydrothermal activity in the Jiaodong gold province, China[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1469–1483.
- [57] Yang J H, Zhou X H. Rb–Sr, Sm–Nd, and Pb isotope systematics of pyrite: Implications for the age and genesis of lode gold deposits[J]. *Geology*, 2001, 29(8): 711–714.
- [58] Cai Y C, Fan H R, Santosh M, et al. Evolution of the lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton: Constraints from mafic dykes in the Jiaobei terrain [J]. *Gondwana Research*, 2013, 24: 601–621.
- [59] 杜泽忠, 程志中, 姚晓峰, 等. 胶东谢家沟金矿热液蚀变作用过程的元素迁移规律[J]. *地质通报*, 2020, 39(8): 1137–1152.
- [60] 王建, 朱立新, 马生明, 等. 胶东三山岛北海域金矿床热液蚀变作用研究[J]. *地质通报*, 2020, 39(11): 1807–1826.
- [61] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等. 胶东金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1–7.
- [62] Deng J, Liu X, Wang Q, et al. Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C–D–O–S–Sr isotope compositions[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65: 674–686.