



引文格式: 刘尚贵, 张向飞, 苟正彬, 等. 厄立特里亚 Kerkebet 及邻区地质构造演化及成矿作用简述[J]. 西北地质, 2026, 59(4): 201–213. DOI: 10.12401/j.nwg.2025183

Citation: LIU Shanggui, ZHANG Xiangfei, GOU Zhengbin, et al. Brief Description of Geological-Tectonic Evolution and Metallogenesis at Kerkebet and Adjacent Areas in Eritrea[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(4): 201–213. DOI: 10.12401/j.nwg.2025183

厄立特里亚 Kerkebet 及邻区地质构造 演化及成矿作用简述

刘尚贵¹, 张向飞^{2,3,4,5,*}, 苟正彬², 陈宣谕¹, 姜丽莉², 陈莉²,
刘晨阳¹, 杨福华^{2,5}, 王小丽^{2,5}

(1. 蜀道矿业集团有限责任公司, 四川 成都 610094; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心/西南地质科技创新中心, 四川 成都 610218; 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 5. 成都理工大学地球与行星科学学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 厄立特里亚 Kerkebet 勘查区位于努比亚地体内 Augaro-Adobha 成矿带, 成矿条件优越。近年来在该区的找矿勘查取得重大突破, 发现评价了 Mier 中型金矿床。调查显示勘查区内多个目标区 (Shukula、Locotat、Yasiney、Koken 等) 均显示较大的金多金属矿找矿潜力, 成矿作用明显受地质构造演化控制。然而, 受基础地质调查和综合研究程度限制, 该区域尚未开展系统的地质构造演化调查和研究工作, 严重制约了区域及 Kerkebet 勘查区的找矿勘查和理论指导。基于此, 笔者通过系统梳理区域及 Kerkebet 勘查区已有资料, 结合野外地质调查研究, 采用“多岛弧盆系”构造理论对以往的 Nakfa 地体重新划分了区域构造单元, 划分出①Barka 岩浆弧、②Kerkebet 俯冲增生杂岩带、③Nakfa 岩浆弧等 3 个一级构造单元; 对金多金属矿体主要赋存的 Kerkebet 俯冲增生杂岩带进一步划分出 3 个二级构造单元; 揭示 Kerkebet 俯冲增生杂岩带构造演化阶段与不同矿化类型金矿床形成的耦合关系; 基于不同的构造单元对应相似的或不同的岩组/段, 构建了 Kerkebet 增生杂岩带构造-地层格架。该区特定矿床具有反映大地构造环境时空专属性的特点, 结合区域矿床类型组合及分布情况, 构建了该区构造演化-成矿作用模式。研究为深化区域构造-成矿作用理论提供基础依据, 为 Kerkebet 勘查区下一步找矿勘查实践指明方向。

关键词: 构造演化; 岩石组合; 成矿作用; 努比亚地体; Kerkebet; 厄立特里亚

中图分类号: P548

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)04-0201-13

Brief Description of Geological-Tectonic Evolution and Metallogenesis at Kerkebet and Adjacent Areas in Eritrea

收稿日期: 2026-01-16; 修回日期: 2026-03-16; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金(42473021、92055314), 四川省“天府万人计划”杰出科学家项目(川万人第 023 号), 中国地质调查局项目(DD20230900501)和云南省科学技术奖杰出贡献奖项目(2017001)联合资助。

作者简介: 刘尚贵(1988–), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查和研究。E-mail: 573665231@qq.com。

* 通讯作者: 张向飞(1985–), 男, 正高级工程师, 博士, 从事基础地质与区域矿床学研究。E-mail: zhangfei1895@163.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

LIU Shanggui¹, ZHANG Xiangfei^{2,3,4,5,*}, GOU Zhengbin², CHEN Xuanyu¹, JIANG Lili²,
CHEN Li², LIU Chenyang¹, YANG Fuhua^{2,5}, WANG Xiaoli^{2,5}

(1. Shudao Investment Group Limited Liability Company, Chengdu 610094, Sichuan, China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey / Geosciences Innovation Center of Southwest China, Chengdu 610218, Sichuan, China; 3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Xi'an Center of China Geological Survey / Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 5. School of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

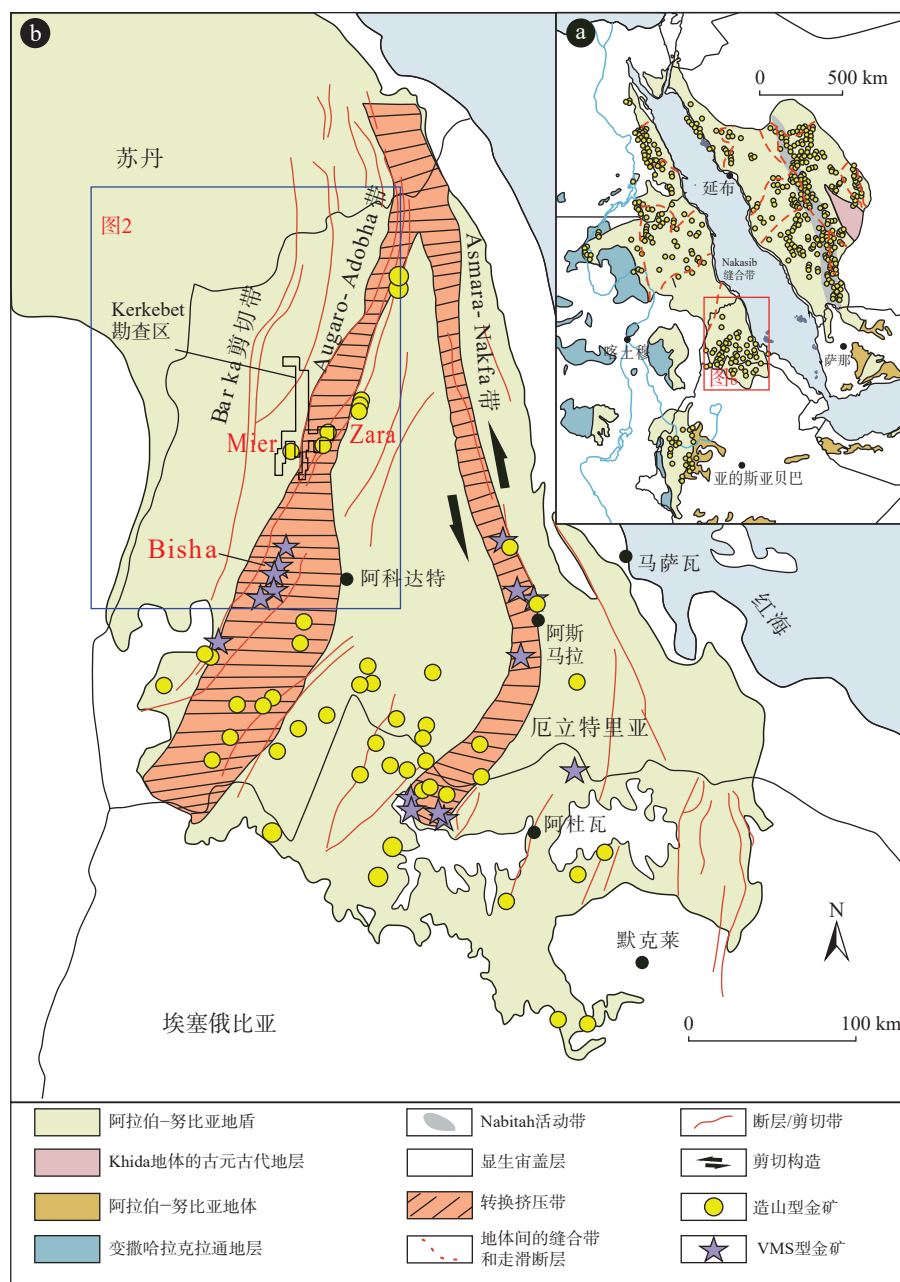
Abstract: Located in the Augaro-Adobha metallogenic belt in the Nubian terrane, the Kerkebet exploration area shows superior metallogenic conditions in Eritrea. Recent years, major breakthroughs have been made in this exploration area, and the Mier medium-sized gold deposit has been found and evaluated. It is also found by field investigation that many target areas (e.g., Shukula, Locotat, Yasinay, Koken et al.) in this area show great gold polymetallic prospecting potential, and the mineralization is obviously controlled by geological-tectonic evolution. However, due to the limitation of previous basic geological survey and comprehensive researches, this region has not yet carried out systematic studies on geological-tectonic evolution, which seriously restricts the prospecting exploration and theoretical guidance. Based on this, after systematically sorting out the existing data of this region, this paper adopts the "multi-island-arc-basin system" tectonic theory to re-divide the previous Nakfa terrane into three new tectonic units (Barka magmatic arc, Kerkebet subduction accretionary complex, and Nakfa magmatic arc), among which the Kerkebet subduction accretionary complex was further divided into three second tectonic units, and reveals the relationship between tectonic evolution stages and different gold deposit types of the Kerkebet subduction accretion complex belt, combined with field investigations and researches. We also construct the tectonic-stratigraphic framework of this region, based on the fact that different tectonic units correspond to similar or different rock groups/segments. According to the fact that specific deposits have the characteristics of reflecting the temporal-spatial specificity of the tectonic environment, we also constructed the tectonic-mineralization model based on regional deposit types and distribution. These researches will not only provide the basis for deepening the theory of regional tectonics-metallogenesis, but also point out the directions for the next prospecting and exploration practice at Kerkebet.

Keywords: tectonic evolution; rock combination; metallogensis; Nubian terrane; Kerkebet; Eritrea

厄立特里亚地处东北非之角最北部,西与苏丹接壤,南邻埃塞俄比亚,东南与吉布提相连,东临红海,与沙特阿拉伯、也门等国家隔红海相望(图 1a)。大地构造背景为阿拉伯-努比亚克拉通西南侧之努比亚地体,整体呈中部高,东、西两侧低,经历了长期地壳演化历史(Drury et al., 1998; Ghebreab et al., 2009; Zoheir et al., 2023),从约 900 Ma 开始进入莫桑比克洋演化阶段,之后在洋壳俯冲过程中实现了东、西冈瓦纳的拼合,于约 650 Ma 开始进入泛非造山过程,直至约 550 Ma 形成阿拉伯-努比亚克拉通(潘桂棠等, 2009; Robinson et al., 2014; 查显锋等, 2023)。红海-亚丁湾裂谷在新生代(30~25 Ma)伸展从而将阿拉伯-努比亚克拉通分离,形成阿拉伯和努比亚两个由岛弧型火

山岩岩群所组成的地体(Johnson et al., 2011; 魏浩等, 2015; 赵凯等, 2020; 向文帅等, 2021; Watts et al., 2025)。900~550 Ma 漫长的地质历史中,努比亚地体经历的一系列复杂的构造演化过程导致该区域发育多期多阶段的构造、岩浆、变质和热液作用,形成不同期次花岗岩类、岛弧组合、增生杂岩和弧下岩石圈等,从而形成多期多阶段不同类型的金多金属矿床(Fritz et al., 2013; 姚华舟等, 2019)。

努比亚陆块金多金属矿床主要有两种类型:块状硫化物(VMS)型和造山型。块状硫化物矿床主要形成于努比亚弧间或弧后盆地,赋存于具岛弧特征(OIB 型)的新生低级变质海相火山岩系列,形成于莫桑比克洋俯冲阶段。造山型金矿集中在剪切/断裂系



a. 阿拉伯-努比亚地体金矿点分布图; b. 厄立特里亚成矿区带及金矿分布图

图1 努比亚地体及厄立特里亚金矿产分布图(据 Johnson et al., 2011; 2017 修改)

Fig. 1 Gold deposits distribution in Nubia Terrane and Eritrea

统内强烈变质的火山岩、火山碎屑岩和/或小型长英质侵入体中的张性雁列式裂隙中,具有剪切转压/转流特征,多以含金石英脉产出,部分地段可见切穿 VMS 矿床,主要形成于泛非造山作用过程(Ghebreab et al., 2009; Johnson et al., 2012; Zoheir et al., 2019)。通过野外调查研究,发现造山型金矿有叠加复合于早期 VMS 型金矿的复合成矿作用现象,如在厄立特里亚的西北部的 Mier 矿区。厄立特里亚主要发育西部 Au-

gara-Adobha 成矿带、东部 Asmara-Nakfa 成矿带两条金多金属成矿带(图 1b)。

新元古代 Augara-Adobha 金矿带沿 NE-SW 向延伸,贯穿厄立特里亚西部地区,发育由钙碱性火山岩、火山碎屑岩及整合上覆绿泥石片岩、粗粒砂岩和复合碎屑砾岩以及碳酸岩夹块状硫化物层,代表了一套残余岛弧及弧后盆地沉积建造,是金多金属矿床的主要赋矿层位。该成矿带典型矿床包括 Bisha 大型金

铜多金属矿床(VMS)、Zara 大型金铜多金属矿床(脉型)、Mier 中型金多金属床(韧性剪切带型),矿床类型各不相同(Barrie et al., 2007; Zoheir et al., 2019)。Mier 矿床即为厄立特里亚西北部克尔克贝特勘查区近年来新发现的一个中型金矿床(接近大型规模),平均品位为 3.05×10^{-6} (图 1b)。

克尔克贝特勘查区即位于 Augaro-Adobha 成矿带中部,包含 Mier 中型金矿床和多个重要勘查目标区,通过十余年的找矿勘查和综合研究,取得较大找矿突破,积累了丰富的勘查成果。然而,由于该区域以往基础地质调查工作程度较低,综合研究工作不足,严重限制了对区域构造演化与成矿作用的准确认识,也大大制约了克尔克贝特勘查区下一步的找矿勘查部署。为了系统梳理区域构造演化与成矿作用,笔者选择克尔克贝特勘查区及邻区为研究对象,充分利用找矿勘查和综合研究积累的成果,构建区域构造演化与成矿模式,助力勘查区下一步找矿勘查取得更大突破,同时进一步揭示区域成矿规律,深化区域构造演化与成矿作用的理论认识。

1 构造单元划分

努比亚地体形成于新元古代岛弧和弧后增生过程,主要由低级变质的绿片岩相组成,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,即绿片岩组合。该组合包括安山岩、玄武岩、流纹岩、玻屑沉积以及变硬砂岩、大理岩和板岩等。Berhe(1990)依据一系列 N-NE 向深大断裂将厄立特里亚划分为 Barka、Hagar、Adobha Abi Domain 和 Nakfa 4 个地块(Cottard et al., 1986; Robert et al., 2005; Dubé and Gosselin, 2007; Johnson et al., 2011, 2017; Klemm, 2013)。

然而,笔者通过对不同地体内岩性组合研究及野外大量调查等,发现不同地体具备特定构造意义,如岩浆弧岩性组合、增生杂岩组合等。基于此,依据板块构造、多岛弧盆系、大陆边缘增生碰撞造山等构造理论,通过综合研究分析多条俯冲增生杂岩带物质组成、构造变形样式、形成时限、就位机制、陆缘岩浆响应、沉积盆地等,对厄立特里亚中西部构造单元进行了重新划分。从西向东划分为:Barke 岩浆弧、Kerkebet 俯冲增生杂岩带、Nakfa 岩浆弧;Kerkebet 俯冲增生杂岩带又可划分为 Pushidong 蛇绿混杂岩带、

Shukula 洋内弧增生杂岩带、Locotat 洋岛-海山增生杂岩带(表 1,图 2;向文帅等,2024;曾国平等,2024)。

表 1 厄立特里亚西北部构造单元划分表

Tab. 1 Division framework of tectonic units of NW Eritrea

一级构造单元	二级构造单元
Barka 岩浆弧	Pushidong 蛇绿混杂岩带
Kerkebet 俯冲增生杂岩带	Shukula 洋内弧增生杂岩带
	Locotat 洋岛-海山增生杂岩带
Nakfa 岩浆弧	

1.1 Barka 岩浆弧

出露于厄立特里亚西北部,位于 Barka 缝合线以西,主要由新元古代的花岗岩、片麻状花岗岩、闪长岩、辉长岩、古近纪的花岗岩和新元古代的片麻岩、石榴石云母片岩和角闪石云母片岩组成,偶见角岩、钙质石墨片岩和少量的大理岩。Barke 弧经历了多期次的强烈变形,含蓝晶石、十字石等变质矿物,变质等级可达角闪岩相,是该区域变质程度最高的地质单元。花岗岩平面上呈椭圆状岩基、岩株或岩脉,其长轴方向与区域构造线(NNE 向)一致。斑状花岗岩呈浅红色、灰色,似斑状结构,斑晶主要为石英、钾长石和斜长石,局部可见钾长石发生明显的绿泥石化、绿帘石化。

1.2 Kerkebet 俯冲增生杂岩带

即所谓的 Nakasib 缝合带(Berhe, 1990; Johnson et al., 2017),可与阿拉伯地体的 Birumg-Thurwah 带相连,属新元古代 780~750 Ma 洋壳俯冲碰撞的产物(Johnson, 2003),该增生杂岩带逆冲推覆于东侧相邻的 Nakfa 岩浆弧。依据岩石组合及构造环境的不同,其又可划分出 3 个二级构造单元。

(1)Pushidong 蛇绿混杂岩带:西以 Barka 缝合线与 Barka 岩浆弧相隔,东与 Shukula 含洋内弧残块增生杂岩带相邻。主要含有中新元古代超基性岩(镁铁质岩石)和薄层的大理岩,由数个海洋和增生楔物质组成的椭圆形构造地质体构成。绿泥片岩与绿岩化的玄武岩互层,夹有绿帘石和绿泥石化变质玄武岩,偶见薄层的大理岩和含铁硅质岩,代表了蛇绿岩序列(Berhe, 1990)。辉长岩呈后期侵入产出,大致沿 SN 向分布,个别岩体较大,粒度以中-粗粒为主。局部明显可见其逐步片理化、辉石绿泥石化、长石云母化,向绿泥石片岩逐步蚀变。

(2)Shukula 含洋内弧残块增生杂岩带:夹持于 Pushidong 蛇绿混杂岩带和 Locotat 洋岛-海山增生杂

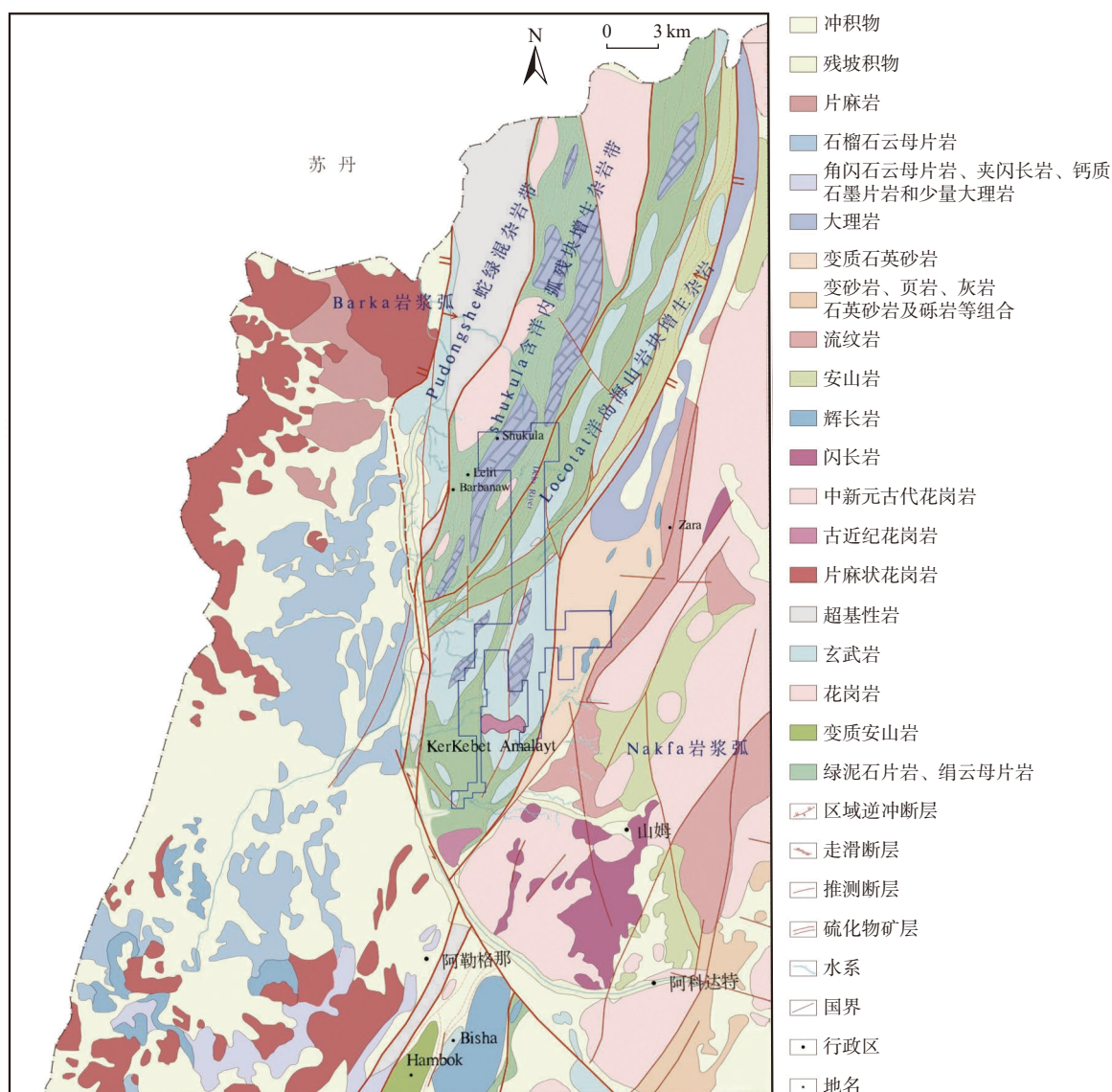


图2 厄立特里亚西北部构造简图

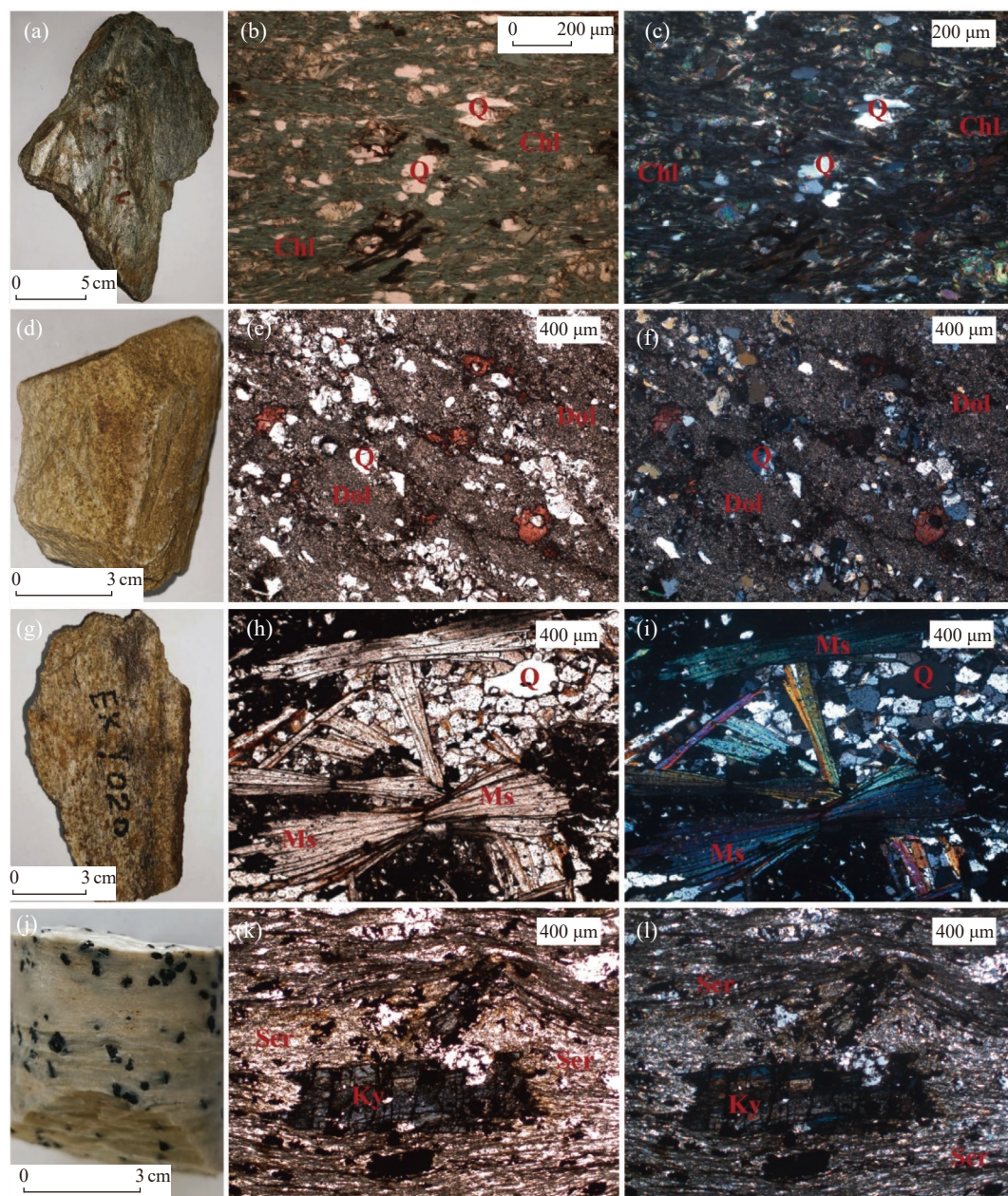
Fig. 2 Structural diagram of Northwestern Eritrea

岩带之间,主体为以洋壳为基底的洋内弧,主要由富Ni玄武岩、高镁安山岩和大理岩、变花岗岩类等组成,其中花岗岩多为洋中脊花岗岩或斜长花岗岩,韧性剪切带发育。受区域变质作用,带内主要发育绢云母绿泥片岩、大理岩等。

绢云母绿泥片岩(图3a~图3c)主要呈NE向、少量NW向的带状分布,岩石风化程度不等,风化面为浅灰色,新鲜面为灰绿色。鳞片粒状变晶结构,片状构造。主要矿物成分:鳞片状变晶结构绿泥石,常风化为细小片状,硬度小于小刀,约占35%;鳞片状变晶结构绢云母,丝绸光泽,呈定向排列,硬度小于指甲,约占25%;灰白色自形-半自形石英,以结晶粒状分散分布,少量呈粒柱状,约占30%;其他矿物约占10%。

与其他岩石多呈侵入接触关系或变质岩相相变接触关系。大理岩(图3d~图3f)主要在Kerkebet勘查区的北部,最厚可达150~200m,两侧及岩层中部均可见磁铁矿呈条带状产出,出露最宽处约15m,厚度不均,呈不连续产出。大理岩两侧可见有褐铁矿化磁铁矿石岩,含铁品位较高,目测最高可达40%~50%。大理岩呈粒状变晶结构,白云石变晶呈自形-半自形粒状,高级白干涉色,茜素红不染色,约占70%,分布不甚均匀;石英呈无色自形-半自形粒状,以细粒为主,分布亦不甚均匀,约占20%;其他矿物约占10%,主要由方解石变晶、白云母变晶和其他矿物变晶组成。

(3)Locotat含洋岛海山岩块增生杂岩带:东以Adobha-Abi河谷与Nakfa岩浆弧相隔。主要以玄武岩



a~c. 绿泥石片岩手标本及镜下单偏光和正交光下照片；d~f. 大理岩手标本及镜下单偏光和正交光下照片；g~i. 白云母石英片岩手标本及镜下单偏光和正交光下照片；j~l. 含蓝晶石片岩手标本及镜下单偏光和正交光下照片；Q. 石英；Chl. 绿泥石；Ms. 白云母；Dol. 白云石；Ser. 绢云母；Ky. 蓝晶石

图3 Kerkebet 勘查区典型岩石手标本及镜下照片

Fig. 3 Typical field photographs and photomicrographs at Kerkebet exploration area

和大理岩互层产出为特征,可见大理岩与玄武岩共存的现象,偶见硅质岩。该带也是矿床集中分布的构造单元,如 VMS 型 Bisha 金矿形成时代约为 800 Ma (Barrie et al., 2007)。受区域变质作用,带内主要发育云母片岩、大理岩、辉长岩等。

云母片岩(图 3g~图 3i)仅在 Locotat 地区发现,新鲜面呈浅-深灰色,或其他颜色,风化后呈浅黄色,

斑状变晶结构或粒状鳞片变晶结构,片状构造。变斑晶主要由白云母组成,呈无色、自形-半自形、片状,具束状局部偏集特征,约占 30%~40%;变基质约占 60%~70%,主要由石英、白云母和少量绢云母、长石等组成。片岩中常见绿泥石、石英、蓝晶石(图 3~图 3l)、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等金属矿物。蓝晶石分布不甚均匀,呈粗-中细粒、自形-半自形、绿色柱状结构,

局部聚集,长轴测量结晶粒度 $<5.00\sim 0.10\text{ mm}$,长轴展布无序,具典型多色性。硫化物多呈 $0.5\sim 4\text{ cm}$ 的细脉状、脉状、粒状不均匀分布,硫化物之间多为硅质胶结,石英主要呈脉状、透镜状。大理岩主要在 Kerkebe 勘查区中南部,向南延伸受断层影响厚度突变为 $10\sim 30\text{ m}$,两侧及岩层中部均可见磁铁矿呈条带状产出厚度不均。辉长岩较为发育,呈后期侵入产出,大致沿 SN 向分布,个别岩体较大。

1.3 Nakfa 岩浆弧

西以 Adobha-Abi 河谷为界,东部以红海为界。由钙碱性的火山岩、火山碎屑岩砂岩和砾岩组成,偶见泥质绢云母片岩和碳酸盐岩。变质火山岩被不同变形的深成岩到浅成岩的钙碱性岩体侵入,形成年代约 850 Ma ,与厄立特里亚中部、南部努比亚地体早期弧岩浆活动的年龄相当(Johnson et al., 2017)。花岗岩主要出露在 Mekelata 地区及以东,平面上呈椭圆状,其长轴方向沿 NNE 向展布。斑状花岗岩呈浅红色、灰色,似斑状结构,斑晶主要为石英,局部可见钾长石发生绿泥石、绿帘石化蚀变。辉长岩呈后期侵入产出,呈中-粗粒状。

该岩浆弧被几条近平行于区域走向(NNE)的狭窄剪切带切割,部分地段被后期花岗岩和辉长岩侵位,代表了一个残余岛弧组合,该带已发现多个 VMS 多金属矿床和岩浆活动相关的金矿远景区分布。

上述构造单元普遍经历了努比亚造山中等区域变质、泛非造山强烈动力变质以及多期构造热液蚀变作用,使得沉积-火山岩地层及岩性更加复杂。此外, Kerkebet 增生杂岩带由一系列走向近 SN、NNE 向的叠瓦状排列、大小不等、岩性不同的构造透镜状楔形体单元组成。各楔形体单元东、西边界均为韧性剪切带分隔,造成楔形体单元内部地层层序相对完整,但地层顶、底不全,最终形成“局部有序、总体无序”的地层分布空间格架。综合研究发现不同的增生楔单元对应相似的或不同的岩组、岩段,据此建立了 Kerkebet 增生杂岩带构造-地层格架(表 2)。

2 Kerkebet 勘查区地质构造格架及演化

克尔克贝特勘查区基本构造格架受区域上 NNE 走向的韧性剪切带控制(图 2),经历了长期多次的构造、岩浆活动、褶皱、韧性剪切带和脆性断裂构造事件。勘查区内发育一条走向 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 的片理化带,平

面上呈反“S”形,是区域上韧性剪切带的一个次级分枝,带内岩石发生强片理化,局部可见“S-C”组构和眼球状构造,显示多期活动特征。片理化带及两侧发育同向或与主构造线斜交的次级断裂,按构造线方向可以分为 NNE、NE 和近 EW 向。背形构造主要分布于勘查区中、西部,主体为 Kerkebet 俯冲增生杂岩带的基质,即绢云母片岩和绿泥石片岩中的变形。向形主要分布于勘查区南部,绢云母绿泥石片岩、绿泥石片岩中的变形发育。Kerkebet 增生杂岩带的构造形态并非一般向形与背形所能概括,而是经历了多期次、高强度构造作用后形成的复杂构造组合。构造面理置换与紧闭同斜、倒转褶皱构成了构造体系的主体,深刻反映了该区域地质演化的剧烈程度(图 4、图 5)。其中, Shukula 和 Koken 目标区露头观察发现,至少发育两期构造应力事件:①早期左行压扭应力作用下形成了韧性剪切带,沿绢云母石英片岩岩层发生顺层破碎,形成系列透镜体(图 4a);②由于构造反转,早期剪切带由韧性向脆性演化,形成了晚期右行压扭应力作用下的脆性构造叠加,破碎带形成。在上述过程中,含矿热液在其中运移过程中可发生蚀变和金沉淀,进而富集成矿。

通过详细的野外地质调查,发现 Kerkebet 勘查区俯冲增生杂岩带的大型褶皱不甚发育,以发育一系列近 SN 向展布的韧性剪切带为特征。前人研究发现, Kerkebet 俯冲增生杂岩带构造模式为一系列断面西倾的逆冲断层(Drury et al., 1998),但笔者仅在 Mier 矿区和营地(Camp)附近地表识别出断面西倾的逆冲断裂,其他地区韧性剪切断裂面均为东倾。

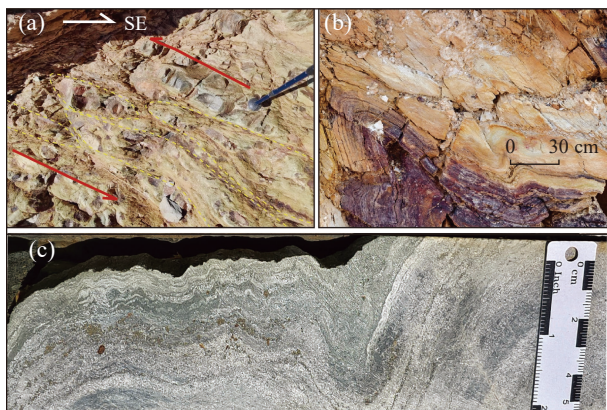
值得注意的是, Kerkebet 俯冲增生杂岩是板块活动过程中形成的重要地质体,是板块俯冲作用最直接的地质记录,也是理解板块俯冲作用和造山带演化的关键地区。增生杂岩带持续的俯冲作用导致各个岩块物质一系列逆冲叠覆,形成叠瓦状构造,使增生杂岩体积不断增大。此外,俯冲带物质脱水反应释放的流体(包括含矿流体)又促进岩石部分熔融和变质,形成区域变质变形构造,甚至形成蓝晶石片岩、蓝闪石片岩、榴辉岩等高压变质岩和相关热液矿床等。Kerkebet 俯冲增生杂岩带是努比亚地体的核心组成,其复杂的物质组成和变质变形特征为揭示地球动力学过程、古板块重建、及资源勘查、地震预警都提供了关键窗口信息。增生楔造山过程中与流体运移活动相关的 Cu、Au 多金属矿产关系密切。

表 2 Kerkebet 勘查区构造-地层时空格架

Tab. 2 The tectonic-stratum tempo-spatial framework at Kerkebet exploration area

时代	年龄 (Ma)	Kerkebet增生杂岩带						Baden剪切带	
		Barka缝合带	Koken	Yasinay	Locotat	Mier	Camp	Aradaib	河流、冲积平原
		河流冲积平原		河流、冲积平原	河流	河流	河流	河流、冲积平原	河流、冲积平原
埃迪卡拉纪	Q								
	550								
	640								
	680								
成冰纪	720		白云母片岩岩组						砂板岩组
		变凝灰岩岩组	变长英质岩组	变长英质岩组	变长英质岩组	变长英质岩组	变长英质岩组	变长英质岩组	变凝灰岩组
	760								
					仅钻孔见大理岩				大理岩组
拉伸纪	800								
		Barka 蛇绿混杂岩群 (Barka Group)	变玄武岩岩组	变玄武岩岩组	变玄武岩岩组	变玄武岩岩组	变玄武岩岩组	变玄武岩岩组	变玄武岩岩组
			Hagar 增生杂岩群 (Hagar Group)	块状硫化物层 (含喷气岩)	块状硫化物层 (含喷气岩)	块状硫化物层 (含喷气岩)	块状硫化物层 (含喷气岩)	块状硫化物层 (含喷气岩)	块状硫化物层 (含喷气岩)
	850		双峰式火山岩段	双峰式火山岩段	双峰式火山岩段	双峰式火山岩段	双峰式火山岩段	双峰式火山岩段	双峰式火山岩段
		磁铁玄武岩层							
		变基性-超基性岩组							
	900								
	1 000								

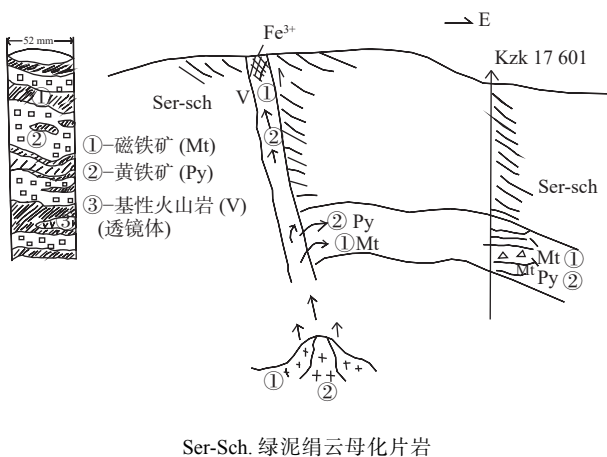
注：1.符号“=”为断层接触；
2.构造地层单元划分按出露规模大小划分为岩群、岩组、岩段、岩层；
3.依据构造单元划分地层空间格架，划分地层时间上纵向序列依据：①地表地层叠置关系(上下关系)、②岩浆喷发演化序列(基性-中性-酸性-喷气-成矿)；
4.变镁铁质岩组(Ⅰ)与变镁铁质岩组(Ⅱ)的识别标志：均以变质基性火山岩(变玄武岩、绿片岩、绿泥片岩、玄武质糜棱岩等)为主要岩石类型，但岩组(Ⅰ)位于双峰式火山岩段或块状硫化。



a. Shukula 露头韧性剪切变形; b. Yasinay 探槽中褐铁矿体褶皱变形; c. Yasinay 钻孔岩心中细粒硫化物纹层与变基性火山岩同步褶曲变形

图4 克尔克贝特勘查区变形构造

Fig. 4 Typical deformation structure at Kerkebet area



Ser-Sch. 绿泥绢云母化片岩

图5 Koken 目标区 KZK17601 钻孔 162.5m 处岩心素描与勘查剖面图

Fig. 5 The sketch of KZK17601 at 162.5 meter deep and exploration profile at Koken target area

Kerkebet 增生杂岩带内韧性剪切带发育,野外调查发现韧性剪切带的时空分布、规模大小与 Cu、Au、Ag 等金属成矿的关系尤为密切。韧性剪切变形通常伴随矿物重结晶作用和定向排列组构。根据剪切应力的强弱,区分为超糜棱岩、糜棱岩、初糜棱岩分带。越靠近强应力带(主断裂),糜棱岩中构造旋转碎斑颗粒越小,甚至完全消失,形成超糜棱岩或千糜岩。韧性剪切带的野外识别标志主要有:①一条或一组挤压型逆冲断裂带;②糜棱岩发育及分带;③糜棱岩的矿物组成及结构构造特征;④通过糜棱岩碎斑结构和旋转方向可以分析判断韧性剪切的运动学方向;⑤拉伸线理。Kerkebet 矿区按矿物成分主要发育 5 类糜棱岩:

玄武岩质糜棱岩、流纹岩质糜棱岩、凝灰岩质糜棱岩、蓝晶石绢云石英片岩质糜棱岩、钙质糜棱岩等。

综合以上调查和分析,可将 Kerkebet 俯冲增生杂岩带的构造演化划分为 5 个阶段(图 6,表 3)。其中,火山喷流型(VMS)块状硫化物矿主要与第一阶段(I)罗迪尼亚超大陆裂解的大规模裂谷晚期喷气沉积有关;造山型金矿(热液蚀变型、石英脉型)主要与第四阶段(IV)泛非造山运动形成的大型韧性剪切作用有关。工作区石英脉的形成也与第三-第四阶段(III-IV)努比亚造山和泛非造山作用形成的区域变质作用和韧性剪切作用有关。

3 Kerkebet 勘查区构造演化模式

矿床/体作为地质作用过程中形成的特殊地质体,受一定的地质构造、变质作用、沉积建造和岩浆活动的控制,成矿作用过程中的特定矿床类型反映了大地构造环境的时空专属性。因此,区域地质构造演化对矿床特征及成矿环境具有至关重要的控制作用。

综合前人研究成果和上述构造-地层分析,认为 Kerkebet 勘查区的形成与成矿作用项目的构造演化主要为 4 个阶段。①约 900~800 Ma(图 7,表 3),莫桑比克洋盆在其形成过程中,从深部(下地壳甚至幔源物质)带来的 Au、Cu、Fe 等成矿元素在基性火山岩-沉积岩系中形成初始富集(图 7a);②晚元古代(800~720 Ma;图 7b)洋壳发生大幅度俯冲消减,形成洋内火山弧,海底火山喷发和热液喷流成矿作用发育,形成了块状硫化物矿床(VMS 型)。在此期间,区域上属于罗迪尼亚超大陆裂解至莫桑比克洋形成-演化阶段,表现为与俯冲相关的岛弧-弧后环境,广泛发育双峰式火山岩、洋岛-海山、岛弧、弧后盆地、弧-弧及弧-陆缝带等,构造演化过程中形成火山成因块状硫化物型金铜多金属矿床,如典型的 Bisha 大型金多金属矿床,形成时代为 780~790 Ma(Barrie et al., 2007);③在前一期成矿作用基础上,叠加了努比亚造山运动或之后的热液成矿作用(720~640 Ma;图 7c),发育中酸性-酸性侵入岩体,叠加于混杂岩(尤其是洋内弧)之上,形成了构造蚀变岩型金矿或石英脉型金矿,并叠加与早期形成的 VMS 矿床之上;④640~550 Ma(图 7d),进入泛非造山运动。随着东西冈瓦纳大陆碰撞,使得区域岩石圈再造,发生达绿片岩相的区域变质作用,地层岩石受到强烈挤压变形,岩石片理化非常发育;沿早期

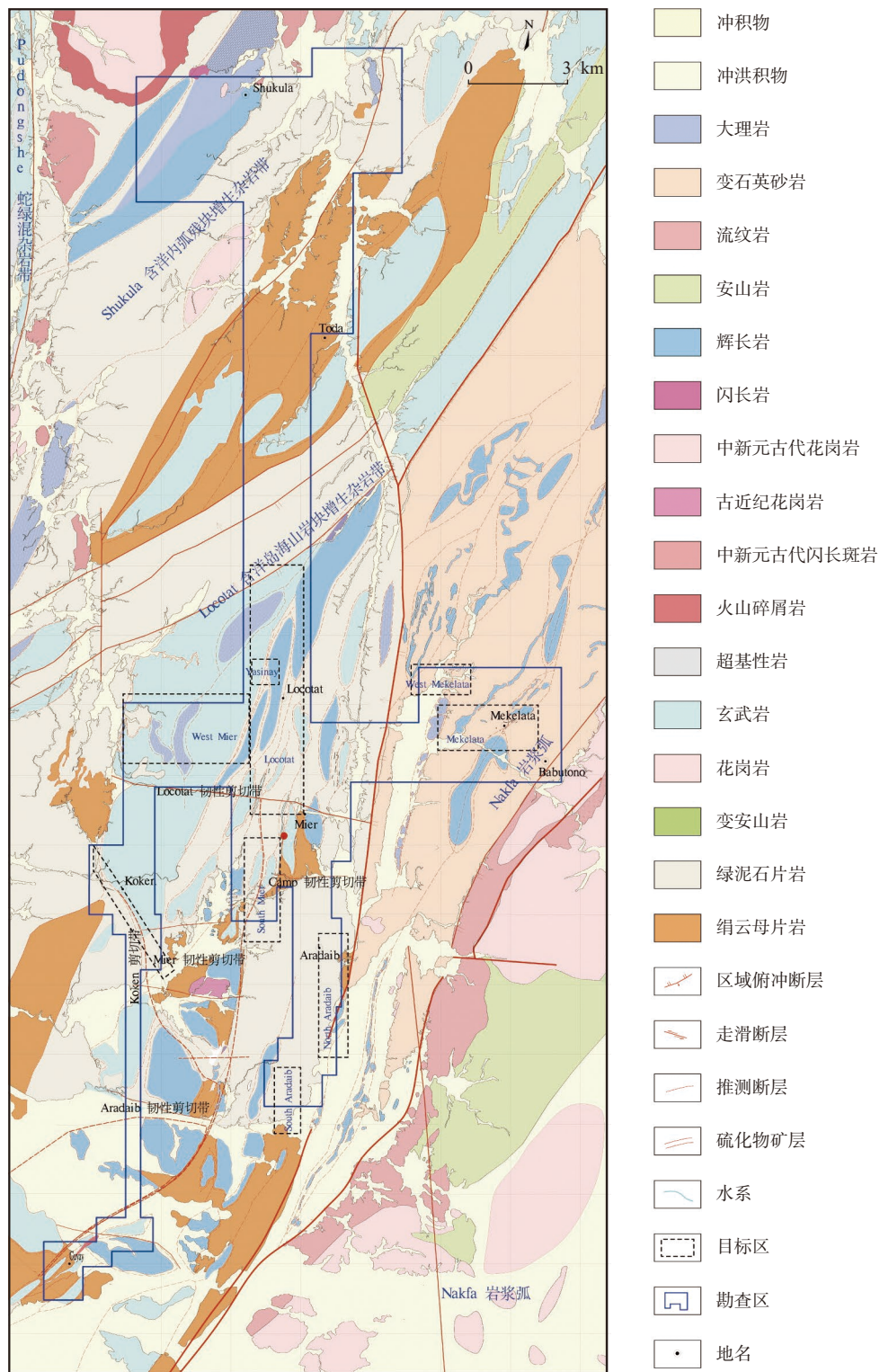


图6 Kerkebet 勘查区地质岩性图

Fig. 6 The geological lithology map of Kerkebet exploration area

形成的弧-弧缝合带,发育逆冲-推覆、走滑-剪切-滑脱构造,使得构造叠加进而更加复杂化,形成大型韧性剪切带及造山型金矿床,演化阶段越晚越有利于大规模矿床的形成(Groves et al., 2018),Kerkebet 矿权区

Mier 矿床即属于这一类型。石英脉型矿床则伴随不同期次区域构造变质热液、岩浆热液运移,均可在有利的储矿空间富集成矿,亦可在原有矿(化)体基础上改造富集成矿。

表 3 Kerkebet 增生杂岩带构造演化阶段划分表

Tab. 3 Stage division of accretionary complex tectonic evolution at Kerkebet exploration area

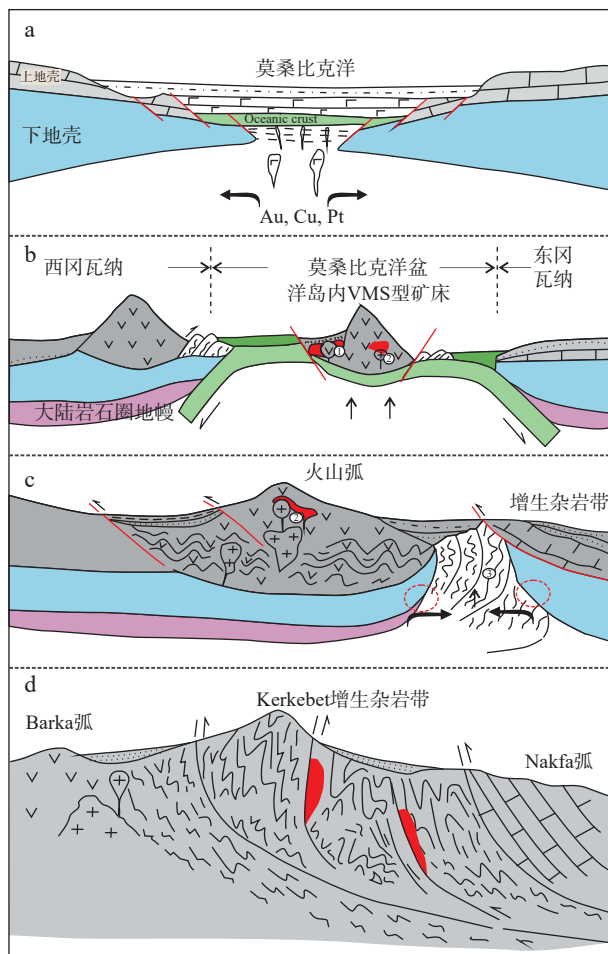
阶段 序号	地质 时代	构造演化阶段	地质年龄 (Ma)	主要地质特征	主要成矿作用及期次	备注
V	埃迪 卡拉 纪 (震旦 纪)	造陆运动、风 化剥蚀	550~500			是否发育后碰 撞伸展?
IV		泛非造山运动 形成冈瓦纳超 大陆 韧性剪切、岩 浆岩侵位	600~550	韧性剪切、构造抬升 岩浆侵位、构造热液 活动 (辉长岩、花岗岩)岩浆 热液活动	造山型金矿(Ⅱ期成矿) 热液蚀变型铜~金矿 (Ⅲ)石英脉型金矿(与韧性剪切切割 片理面或近轴向相关)	标志性事件: 埃迪卡拉生物 群(无)
III	成冰 纪 (南华 纪)	Nubian努比亚 造山运动 形成非洲大陆	680~640	区域变质、构造抬升、 造山增生杂岩 增生楔的形成 岩浆侵位初步形成冈瓦 纳大陆(花岗岩)	(Ⅱ)区域变质石英脉沿片理面发育并 形成褶皱 (Ⅰ)区域变质热液活动与成矿 构造热液活动与成矿 岩浆热液活动与成矿(改造富集 成矿)	标志性事件: 雪球事件(勘察 区未见)
II		冈瓦纳超大陆 形成	750~720 (成熟洋)	洋岛火山岩、洋内弧、 蛇绿岩	VMS块状硫化物矿形成 Cu、Au、Zn矿(Ⅰ期成矿)	
		莫桑比克洋盆	800~750 (大洋)	洋岛-海山、深水沉积		
I	拉伸 纪		850~800	双峰式火山岩、喷气岩、 凝灰岩 大规模裂谷、枕状 玄武岩	成矿物质预富集	
		罗迪尼亚超大 大陆的裂解		大陆裂解、接受海水沉 积作用		勘察区未见
		中元古代	罗迪尼亚超大陆的形成			勘察区未见
		古元古代	哥伦比亚超级大陆的形成			勘察区未见

注: 与东非大裂谷(红海洋盆)有关的构造活动在Kerkebet区影响较小, 主要表现为小断层和岩脉产出(Massawe et al., 2012) 以及密集发育的节理带(绿片岩和石英脉), 节理产状 $210^{\circ}<78^{\circ}$ (Aradaib TC2505附近)。

Beyth et al.(2003)通过对厄立特里亚东部不同变质程度的变质岩测年,揭示其原岩形成于 850~800 Ma,高度变质岩于约 650 Ma 的峰期变质温度可达 700 ℃,压力约为 12 kbar(深约为 40 km)。前人对埃及东部沙漠广泛分布的深成岩体进行系统测年统计,可以划分为 3 期主要的岩浆侵入事件:①俯冲相关花岗岩体形成时代约 741 Ma;②与中地壳片麻岩于 620~590 Ma 折返相关的晚造山混合花岗岩;③碰撞后钙碱性-碱性花岗岩形成于 608~540 Ma,可能起源于地壳熔体与地幔熔体的交代混合(Lundmark et al., 2012; Eli-

wa et al., 2014; Zoheir et al., 2021, 2023)。可见,笔者提出的成矿模式是对前人研究观点的进一步细化。

此外,新生代红海-亚丁湾裂谷(30~25 Ma)将阿拉伯-努比亚地盾克拉通分离,形成阿拉伯和努比亚两个由洋内岛弧型火山岩岩群所组成的地质地体。伴随区域拉张应力作用及岩浆、变质热液活动,形成一系列近 EW 向含 Au 石英脉(如 Yasinay 目标区),一般沿走向和倾向延伸有限,品位变化较大;第四纪以来可形成表生氧化淋滤型矿床,如 Mier 矿区地下浅表矿体。



a.莫桑比克洋盆扩张-初始矿源层(岩); b.莫桑比克洋盆俯冲阶段洋内弧 VMS 矿床形成; c.弧-陆碰撞阶段成矿作用; d.碰撞-推覆-剪切构造成矿作用; ①.VMS 型矿床; ②.斑岩-矽卡岩型矿床; ③.构造蚀变岩型矿床

图7 Kerkebet 成矿模式图(据 Li et al., 2021 修改)

Fig. 7 The metallogenic modal of Kerkebet exploration area

4 结论

(1)Kerkebet 造山增生杂岩带被以往的学者称为 Hagar 地体,笔者通过对勘查资料和岩性组合的综合梳理,揭示出一条莫桑比克洋俯冲消亡的增生杂岩带,并对其进一步厘定出 3 个二级构造单元,对深化该区域构造演化认识和找矿方向具有重大意义。

(2)Kerkebet 造山增生杂岩带内韧性剪切带和双峰式火山岩发育,主要形成岛弧演化期相关的新元古代块状硫化物金多金属矿床(VMS 型)和后期叠加改造及韧性剪切带型金多金属矿床,且造山运动越晚,对形成大矿、富矿越有利。

(3)石英脉型金矿床的形成可能贯穿于不同地质构造演化阶段,在 Kerkebet 勘查区东部的 Mekelata 地区可能存在与花岗岩体相关的石英大脉型或矽卡岩型金铜多金属矿床,目标矿种应以金、铜为主。

(4)受 Kerkebet 勘查区目前勘查程度和分析数据限制,上述调查研究和构造-成矿模式,有待更多地质年代学、地球化学、流体包裹体测温工作的验证。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等. 中国大地构造单元划分[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 1-28.
- PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Subdivision of tectonic units in China[J]. China Geology, 2009, 36(1): 1-28.
- 魏浩,徐九华,王建雄,等. 非洲东北部阿拉伯-努比亚地盾(ANS)构造演化与金成矿作用[J]. 地质与勘探, 2015, 51(2): 383-394.
- WEI Hao, XU Jiuhua, WANG Jianxiong, et al. Tectonic evolution and gold mineralization in the Arabian nubian Shield(ANS), Northeastern Africa[J]. Geology and Exploration, 2015, 51(2): 383-394.
- 向文帅,赵凯,张紫程. 厄立特里亚 Augaro 金矿床碳氢氧硫同位素特征及其成因意义[J]. 地质学报, 2021, 95(4): 1284-1291.
- XIANG Wenshuai, ZHAO Kai, ZHANG Zicheng. Studies on C-H-O-S isotopes of Eritrea Augaro gold deposit and its implications for gold deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(4): 1284-1291.
- 姚华舟,李建星,吕鹏瑞,等. 海上丝绸之路沿线陆域地质演化与成矿[J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(1): 1-19.
- YAO Huazhou, LI Jianxing, LV Pengrui, et al. Geological Evolution and Metallogenesis of the Land Area A-long the Maritime Silk Route[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2019, 35(1): 1-19.
- 向文帅,吴颖,赵凯,等. 厄立特里亚 GASH 金矿集区地球化学特征及信息提取[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 184-196.
- XIANG Wenshuai, WU Ying, ZHAO Kai, et al. Geochemical Characteristics and Information Extraction in GASH Ore Concentration Area, Eritrea[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 184-196.
- 查显锋,计文化,辜平阳,等. 阿拉伯地盾地质构造演化与关键地质矿产问题浅析[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 204-213.
- ZHA Xianfeng, JI Wenhua, GU Pingyang, et al. Tectonic Evolution and Key Geological Mineral Issues of Arabian Shield[J].

- Northwestern Geology, 2023, 56(5): 204–213.
- 曾国平, 王建雄, 向文帅, 等. 厄立特里亚西部新元古代岛弧花岗岩对东非造山带构造演化的指示意义[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 159–173.
- ZENG Guoping, WANG Jianxiong, XIANG Wenshuai, et al. The Augaro Arc-type Granite in the Nubia Shield, Western Eritrea: Petrogenesis and Implications for Neoproterozoic Geodynamic Evolution of the East African Orogen[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 159–173.
- 赵凯, 姚华舟, 王建雄, 等. 厄立特里亚 Koka 花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(1): 156–167.
- ZHAO Kai, YAO Huazhou, WANG Jianxiong, et al. Zircon U-Pb Geochronology and geochemistry of Koka Granite and Its Geological Significance, Eritrea[J]. Earth Science, 2020, 45(1): 156–167.
- 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.
- Berhe S M. Ophiolites in NE and east Africa: implications for Proterozoic crustal growth[J]. Journal of the Geological Society, London, 1990, 147: 41–57.
- Beyth M, Avigad D, Wetzel H U, et al. Crustal exhumation and indications for Snowball Earth in the East African Orogen: north Ethiopia and east Eritrea[J]. Precambrian Research, 2003, 123: 187–201.
- Cottard F, Deschamps Y, Bernadet G, et al. Gold deposits of Ariab area [R]. Khartoum, BRGM Report, 1986, 86 (110): 55.
- Drury S A, De Souza Filho C R. Neoproterozoic terrane assemblages in Eritrea: review and prospects[J]. Journal of African Earth Sciences, 1998, 27(3–4): 331–348.
- Dubé B, Gosselin P. Greenstone-hosted quartz-carbonate vein deposits [A]. In: Goodfellow W D (ed.). Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods [M]. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication, 2007, 5: 49–73.
- Eliwa H A, Breikreuz C, Murata M, et al. SIMS zircon U-Pb and mineral K-Ar geochronology and Sr-Nd isotope geochemistry of Neoproterozoic granitoids and their bearing on the evolution of the north Eastern Desert, Egypt[J]. Gondwana Research, 2014, 25: 1570–1598.
- 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.
- Ghebreab W, Greiling R, Solomon S. Structural setting of Neoproterozoic mineralization, Asmara district, Eritrea[J]. Journal of African Earth Sciences, 2009, 55: 219–235.
- Groves D I, Santosh M, Goldfarb R, et al. Structural geometry of orogenic gold deposits: Implications for exploration of worldclass and giant deposits[J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(4): 1163–1177.
- Johnson P R, Abdelsalam M G, Stern R J. The Bi'r Umq-Nakasib suture zone in the Arabian-Nubian Shield: a key to understanding crustal growth in the East African Orogen[J]. Gondwana Research, 2003, 6: 523–530.
- 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: 167–232.
- Johnson P R, Kattan F H. The geology of the Saudi Arabian Shield: Jeddah, Saudi Arabia [R]. Saudi Geological Survey, 2012, 479.
- 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: 63–76.
- Klemm R, Klemm D. Gold and Gold Mining in Ancient Egypt and Nubia [M]. Berlin: Springer, 2013.
- Li W C, Pan G T, Zhang X F, et al. Tectonic evolution of the Paleotethys multi-arc-basin- terrane system and its continuous control of the multi-episodic metallogenesis in the Sanjiang Region, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2021, 221: 104932.
- Lundmark A M, Andresen A, Hassan M A, et al. Repeated magmatic pulses in the East African orogen in the Eastern Desert, Egypt: An old idea supported by new evidence[J]. Gondwana Research, 2012, 22: 227–237.
- Massawe R J, Stanley C R. Lithogeochemistry of host rocks to the Bisha Cu-Zn-Au volcanic-hosted massive sulphide deposit, Eritrea [J]. Atlantic Geology, 2012, 48: 37–38.
- Robert F, Poulson H K, Cassidy K F, et al. Gold metallogeny of the superior and Yilgarn cratons [J]. Economic Geology, 2005, 100th Anniversary Volume: 1001–1033.
- Robinson F A, Foden J D, Collins A S, et al. Arabian Shield magmatic cycles and their relationship with Gondwana assembly: Insights from zircon U-Pb and Hf isotopes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 408: 207–225.
- Watts E J, Rees R, Jonathan P, et al. Mantle upwelling at Afar triple junction shaped by overriding plate dynamics[J]. Nature Geoscience, 2025, 18: 661–669.
- Zoheir B, Holzheid A, Zeh A, et al. The Sukari Gold Deposit, Egypt: Geochemical and Geochronological Constraints on the Ore Genesis and Implications for Regional Exploration[J]. Economic Geology, 2023, 118(4): 719–744.
- Zoheir B, 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.
- Zoheir B, Zeh A, El-Bialy M, et al. Hybrid granite magmatism during orogenic collapse in the Eastern Desert of Egypt: Inferences from whole-rock geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes[J]. Precambrian Research, 2021, 354(3): 106044.