

DOI: 10.12401/j.nwg.2023075

## 阿拉伯地盾地质构造演化与关键地质矿产问题浅析

查显锋<sup>1,2</sup>, 计文化<sup>1</sup>, 辜平阳<sup>1</sup>, 吕鹏瑞<sup>1</sup>, 王国强<sup>1</sup>, 陈锐明<sup>1</sup>, 康磊<sup>1,2</sup>,  
李猛<sup>1</sup>, 孙吉明<sup>1</sup>, 荆德龙<sup>1</sup>, 王凯<sup>1</sup>, 罗克勇<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119; 2. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069)

**摘要:** 阿拉伯地盾位于阿拉伯板块的西南部, 与红海西岸的努比亚地盾共同组成努比亚-阿拉伯地盾, 是新元古代东、西冈瓦纳大陆汇聚过程中形成的泛非造山带的重要组成部分。在“沙特阿拉伯地盾精细地质填图”技术标编制过程中, 笔者综合分析了该区的地质调查和研究成果, 总结了阿拉伯地盾 8 个次级地体、主要蛇绿岩构造混杂岩带及新元古代沉积盆地的地质特征, 并将阿拉伯地盾的地质演化细分为 4 个构造演化阶段。其中, 在新元古代洋-陆转化过程中阿拉伯地盾形成了一系列重要的矿产资源。在此基础上, 系统梳理了区内地层、构造、岩浆作用及与成矿相关的地质问题, 提出了未来精细地质填图过程中的工作建议。

**关键词:** 精细地质填图; 阿拉伯地盾; 泛非造山带; 构造演化

中图分类号: P541; P544

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0204-10

### Tectonic Evolution and Key Geological Mineral Issues of Arabian Shield

ZHA Xianfeng<sup>1,2</sup>, JI Wenhua<sup>1</sup>, GU Pingyang<sup>1</sup>, LÜ Pengrui<sup>1</sup>, WANG Guoqiang<sup>1</sup>, CHEN Ruiming<sup>1</sup>, KANG Lei<sup>1,2</sup>,  
LI Meng<sup>1</sup>, SUN Jiming<sup>1</sup>, JING Delong<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>1</sup>, LUO Keyong<sup>1</sup>

(1. Center for Orogenic Belt Geology of China Geological Survey, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;  
2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Arabian Shield, located in the southwestern Arabian Plate, constitutes the Nubia-Arabian Shield with the Nubia to the west of the Red Sea, and is an important part of the Pan-Africa Orogeny that formed during the convergence of eastern and western Gondwana in Neoproterozoic. During compiling the technical bid of “Detailed Geological Mapping of the Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia”, both progress on geological survey and researches of the Arabian Shield has been comprehensively analyzed. The geological structure of the Arabian Shield is characterized by eight terrenees and ophiolitic mélange zones or shearing zones between them, and is overlain by Neoproterozoic sedimentary basins. Based on these analyses, the tectonic evolution of the Arabian Shield can be classified into four tectonic stages, and a series of metal deposits have been formed during the ocean-continent tectonic transformational process in Neoproterozoic. Moreover, the geological problems related to strata, magmatism, tectonic evolution, and mineralization of the Arabian Shield have been sorted

收稿日期: 2022-12-10; 修回日期: 2023-04-10; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 沙特地质调查局国际合作项目“Detailed Geological Mapping of the Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia”(RFP#SGS-411-007), 中国地质调查局项目(DD20221636), 国家自然科学基金项目(92055314)和陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-249)联合资助。

作者简介: 查显锋(1984-), 男, 高级工程师, 从事构造地质学与区域地质调查工作。E-mail: zha\_xianfeng@126.com。

out, as well as suggestions have been put forward for the detailed geological mapping in the future.

**Keywords:** detailed geological mapping; Arabian Shield; Pan-Africa Orogeny; tectonic evolution

阿拉伯地盾位于阿拉伯板块的西南部,露头地质体以新元古代侵入岩、火山-碎屑岩及新生代火山岩为主(Stern et al., 2010; Muricia et al., 2014),与红海西岸的努比亚地盾共同构成了努比亚-阿拉伯地盾。研究表明,阿拉伯地盾处于东非造山带的北缘,发育典型的泛非期造山带,记录了新元古代东、西冈瓦纳超大陆聚合造山过程的重要地质信息(Doebrich et al., 2007; Cox et al., 2012; Abu-Alam et al., 2014; Koshnaw et al., 2019)。此外,沿红海东海岸发育大量的新生代火山岩是阿拉伯地盾的又一显著特征(Muricia et al., 2014),见证了约30 Ma以来的红海裂谷发展阶段和新生代地壳伸展-减薄过程。因此,阿拉伯地盾成为研究泛非造山作用、地壳物质演化、地壳减薄机制等科学问题的理想场所,而受到广泛关注(Nawab, 1979; Agar, 1987; Johnson et al., 1995, 2003a, 2003b, 2011; Doebrich et al., 2007; Stern et al., 2010; Duncan et al., 2016; 吴福元等, 2020; Ibrahim et al., 2021)。特别是阿拉伯地盾在新元古代地体聚合过程中孕育了优越的成矿地质条件,蕴藏着丰富的固体矿产资源(Küster, 2009; Surour et al., 2013; Surour et al., 2014; Johnson et al., 2017; 向文帅等, 2022; Dawood et al., 2022),如钽、铝土矿、铀、金、银、铜矿等都享有重要的国际地位(吕鹏瑞, 2019; 李福林等, 2022)。

2016年,沙特阿拉伯王国发布了《2030年愿景》,亟待对阿拉伯地盾区地质结构、构造演化等成矿地质背景进一步调查,以便更好地服务于矿业勘查开发,促进矿业发展。中国地质调查局联合中国地质矿业有限公司中标“阿拉伯地盾高精度地质填图”(Detailed Geological Mapping of the Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia)项目。在技术标书编写过程中,笔者在收集阿拉伯地盾已有地质调查和研究资料的基础上,系统总结了阿拉伯地盾地质概况和构造演化过程,初步分析了地层、构造、岩浆作用等与矿产相关的关键地质问题,提出未来精细地质填图过程中的工作建议。

## 1 阿拉伯地盾的大地构造位置及构造单元划分

阿拉伯板块是以阿拉伯半岛为主体的板块,是以

红海-亚丁湾扩张中心、Owen断裂、扎格罗斯-莫克兰(Zagros-Makran)造山带和死海转换断层为界,局限于非洲板块、欧亚板块、印度板块和安纳托利亚板块之间(图1a)的全球主要板块之一。根据露头类型可将阿拉伯板块进一步划分为西南部的阿拉伯地盾和东北部的阿拉伯台地。前者以新元古代侵入岩、火山-碎屑岩为主,局部出露前古元古代岩石(Whitehouse et al., 2001);后者主要为巨厚的、连续的显生宙沉积体,以富含油气资源而著称。

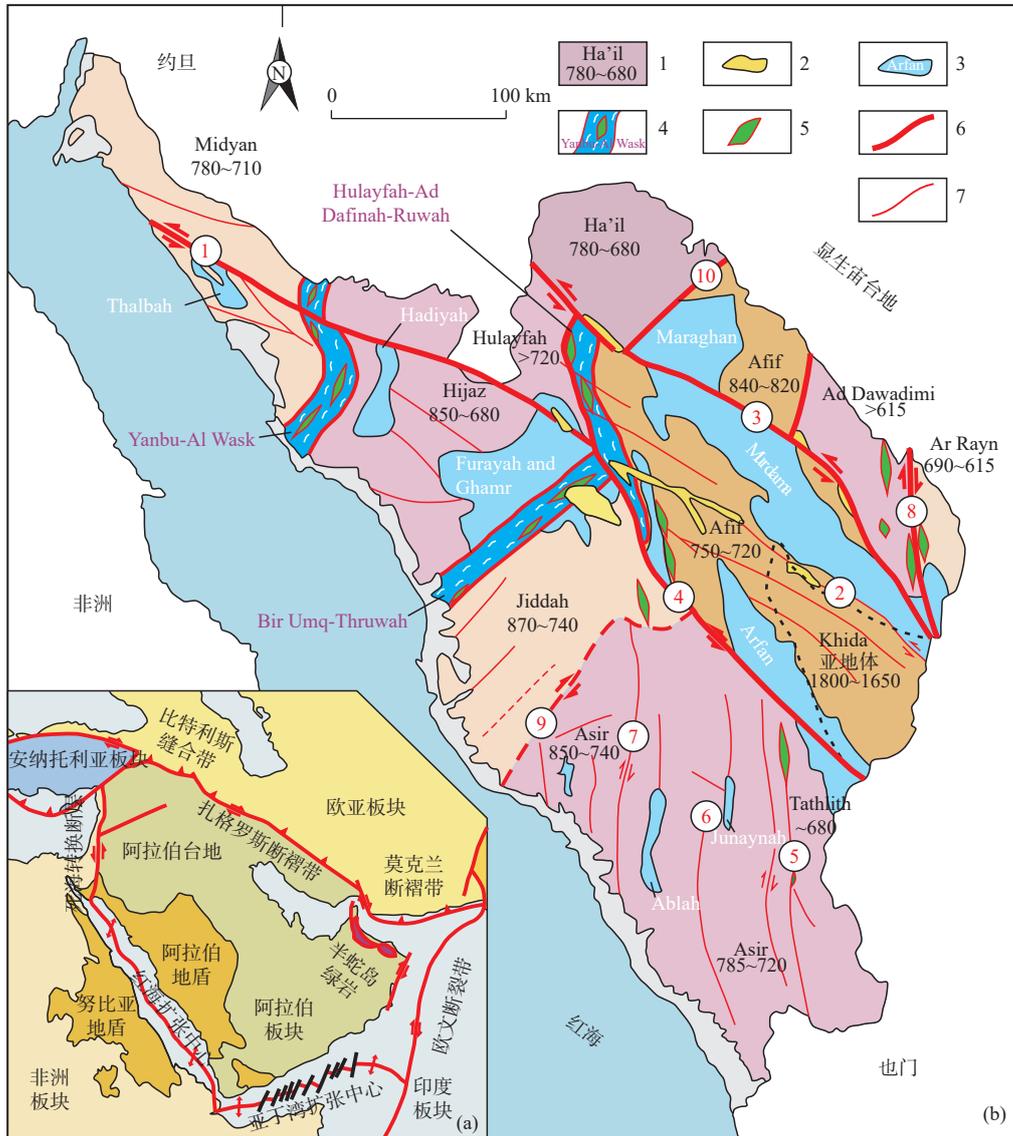
阿拉伯地盾位于东、西冈瓦纳聚合形成的泛非造山带的北段,以发育新元古代(870~627 Ma)蛇绿岩为显著特征(Johnson et al., 2003a, 2003b, 2011; Stern et al., 2010; Abu-Alam et al., 2014; Surour et al., 2014; Hamimi et al., 2014; Hassan et al., 2016; Sehsah et al., 2019; Abuamarah, 2020)。以这些蛇绿构造混杂岩带和主要断裂带为界,可以将阿拉伯地盾划分为Midyan、Hijaz、Jiddah、Asir、Afif、Ha'il、Ad Dawadimi和Ar Rayn等8个地体(Doebrich et al., 2007; Stern et al., 2010; El-Sawy et al., 2019; Gahlan et al., 2023)(图1b)。

## 2 主要构造单元地质特征

阿拉伯地盾是新元古代期间冈瓦纳大陆汇聚、Mozambique洋盆闭合过程中形成的增生型造山带(Cox et al., 2012),经历了大洋俯冲、岛弧形成及碰撞拼合等构造过程(Johnson et al., 2011; Koshnaw et al., 2019)。地盾东部的Al Rayn和Afif地体出露有古老大陆地壳物质,而西部地体则主要是由洋壳演化而来的洋内弧(El-Sawy et al., 2019)。在阿拉伯地盾的基底变质岩系上还发育一系列新元古代磨拉石、裂谷盆地(Johnson et al., 2003a, 2003b; Bamoussa, 2013)记录了增生造山后岩浆-沉积-构造等演化过程的地质信息。

### 2.1 东部弧-盆体系

东部地体主要指Afif、Ad Dawadimi和Ar Rayn地体,以发育新元古代沟-弧-盆体系为主要结构特征(图2),代表了与东冈瓦纳直接碰撞形成的泛非造山带东缘(Doebrich et al., 2007)。其中,Afif(复合)地体是阿拉伯地盾最大的地体,由太古宙-古元古代Khi-



1. 地体名称及年代学(单位为 Ma); 2. Jibalah 拉分盆地; 3. Murdama 碰撞后磨拉石盆地; 4. 蛇绿构造混杂带及名称; 5. 蛇绿岩; 6. 边界断裂; 7. 主要断裂; ①. Qazaz 剪切带; ②. Ar Rika 断裂; ③. Halaban-Zarghat 断裂; ④. Ruwah 断裂; ⑤. Nabitah 断裂; ⑥. Junaynah 断裂; ⑦. Umm Farwah 剪切带; ⑧. Al Amar 断裂; ⑨. Ad Damm 断裂带; ⑩. Sukhaybarat 断裂

图 1 阿拉伯板块大地构造位置图(a)(据 Stern et al., 2010)和阿拉伯地盾构造单元划分图(b)(据 Johnson et al., 2011; Surour et al., 2014; Abd-Allah et al., 2014; Hamimi et al., 2014; El-Sawy et al., 2019; Abuamarah, 2020)

Fig. 1 (a) Tectonic location of the Arabian Plate and (b) tectonic divisions for the Arabian Shield

da 亚地体 ( $\geq 1660$  Ma)(Stacey et al., 1984a; Whitehouse et al., 2001)及 Siham(750~745 Ma)、Nuqrah(约 850Ma)等火山弧亚地体组成(Johnson et al., 2003b)。这些亚地体于 685~680 Ma 进一步形成统一的地体(Stacey et al., 1984b; Doebrich et al., 2007)。

Ad Dawakimi 被认为是与阿拉伯地盾最同质的地体, 尽管对其构造属性的理解存在弧前盆地(Cox et al., 2012, 2019)、被动陆缘或弧后盆地(Doebrich et al.,

2007)等不同认识, 但其主要是由 Abt 组(616~590 Ma)绿片岩相变质的绢云母绿泥石石墨片岩、变质砾岩、钙质片岩和大理岩组成, 厚度大于 5 km。研究认为, 该地体的变质作用发生于约 620 Ma 的碰撞事件(Cox et al., 2012), 并被埃达克质岩石(633 Ma)和后碰撞花岗岩(611~600 Ma)侵入(Robinson et al., 2015; Cox et al., 2019)。

Ar Rayn 地体位于地盾的最东缘, 大部分被显生

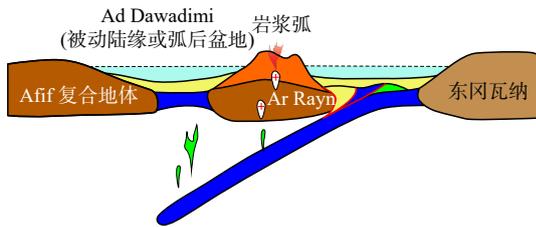


图 2 新元古代阿拉伯地盾东部构造格局示意图  
(据 Doeblich et al., 2007 修改)

Fig. 2 Schematic diagram showing tectonic framework of the eastern Arabian Shield

宙地层覆盖, 主要由 Al Amar 群 (> 689~625 Ma)、岩浆弧杂岩及后期侵入体组成。Al Amar 群主要包括拉斑质-钙碱性玄武岩、流纹质火山岩及火山碎屑岩、凝灰质沉积岩和碳酸盐岩等 (Doeblich et al., 2007), 并在地体东、西部表现出不同的地质特征 (Vaslet et al., 1983)。侵入地体的岩浆岩大致可划分为地体西部的 TTG 岩石组合 (632~616 Ma)、中-东部的高铝 TTG/埃达克质弧岩浆岩 (689~617 Ma)、同碰撞-后碰撞碱性花岗岩 (607~583 Ma)。

## 2.2 西部洋内弧地体

地盾西部地体包括 Asir、Hijaz、Jiddah、Midyan 地体等, 具有新元古代新生洋内弧属性 (El-Sawy et al., 2019), 并拼贴增生构成了早期的努比亚-阿拉伯核心地体 (Johnson et al., 2003a; Stern et al., 2010)。Stoeser 等 (2006) 认为, 地体西部可能存在较古老的新元古代洋内弧核心 (> 800 Ma), 在东部和北部则相对年轻 (> 740 Ma), 而最年轻的弧则为地盾东翼的 Ar Rayn 地体, 呈现由西向东演化的趋势。

Midyan 地体出露绿片岩相变质的 Za'am 群, 其上整合覆盖成冰纪盆地沉积。Za'am 群为一套具有弧岩浆特征的火山岩、侵入岩, 中酸性熔岩表现为拉斑-钙碱性特征, 指示与俯冲相关的构造环境 (Bezenjani et al., 2014)。Jiddah 地体的弧岩浆岩包括辉长岩、苏长岩、闪长岩和英云闪长岩等岩石组合, 北部为由石英闪长岩、英云闪长岩、奥长花岗岩和花岗闪长岩组成的 Dhukhr (816±3 Ma) 和 Furayhah (811±4 Ma) 岩基 (Stoeser et al., 1988), 基岩北部还发育原地的 Mahd 群火山岩 (810~770 Ma) (Johnson et al., 2003a)。Asir 地体也是一个复合地体, 由 An Nimas 弧 (> 790 Ma) 和 Tarib 弧 (785~720 Ma) (Johnson et al., 2003a) 组成, 被近南北向的 Nabitan 断裂分隔为西部的 Asir 地体和东部的 Tathlith 亚地体。Asir 地体以绿片岩相的火山

沉积岩为主, 而 Tathlith 亚地体主要发育角闪岩相片麻岩, 它们都经历 “Nabitan 运动” (680~640 Ma) 最终拼合。

## 2.3 边界断裂及构造带

阿拉伯地盾发育的上述地体往往以蛇绿构造混杂岩带或韧性剪切带作为构造边界 (图 3), 这些混杂岩带也呈现弧-弧或弧-陆碰撞带的构造特征 (Abu-Alam et al., 2014), 并叠加后期走滑构造。典型的蛇绿构造混杂岩带包括: Yanbu-Al Wask、Bir Umq-Thurwah、Hulayfah-Nabitah、Al-Amar、Fatima 等。研究表明, 发育于阿拉伯地盾的这些蛇绿构造混杂岩带可以与红海西侧努比亚地盾上的新元古代蛇绿构造混杂岩带相对比 (Stern et al., 2010; Abd-Allah et al., 2014) (图 3)。这些蛇绿构造混杂岩带可大致划分为 2 类 (Abu-Alam et al., 2014): ① 北东-南西向弧-弧缝合带 (如 Yanbu-Al Wask、Bir Umq-Thurwah) 代表了新生弧地体间 (800~700 Ma) 的缝合带。② 750~630 Ma 发育的南北走向的弧-陆缝合带 (如 Nabitah), 为东-西冈瓦纳碰撞的地质印记。

年代学研究结果表明, 这些蛇绿岩的形成时代也具有西部早、东部晚的规律。Bir Umq-Thurwah 蛇绿构造混杂岩带可与 Sudan 地区的 Nakasib 缝合带相连 (图 3), 被认为是新元古代地体汇聚的开始 (Johnson et al., 2003b)。Fatima 蛇绿岩带中的玄武岩具有高场强元素亏损、大离子亲石元素富集, 显示拉斑-钙碱性火山岩地球化学特征, 表明 Jiddah 地体 (812~720 Ma) 东侧的 (Mozambique) 洋壳向南东俯冲到 Asir 地体之下 (图 4a), Asir 地体 (约 797 Ma) 与西部 Jiddah 地体拼合形成统一的弧地体 (Abd-Allah et al., 2014) (图 4b)。

最东侧的 Al Amar 断裂带, 以 Urd 蛇绿岩为代表, 构造带变形时代为 680~640 Ma (魏浩等, 2015), 可代表努比亚-阿拉伯地盾的雏形在 650~640 Ma 基本形成 (Johnson et al., 2003a)。

除了蛇绿构造混杂岩带, 在阿拉伯地盾还发育 Qazaz-Najd 剪切带、Halaban-Zarghat 断裂等, 记录各块体拼合后的陆内构造演化过程。Qazaz-Najd 剪切带由西北部的 Qazaz 剪切带延伸到东段的 Ar Rika 断裂, 长度超过 1 100 km, 主要沿着早期缝合带 (约 680 Ma) 发育, 剪切活动时代为 635~573 Ma (Stern et al., 2010); 而 Ar Rika 断裂最初活动可能早于 630 Ma。Halaban-Zarghat 断裂和 Ruwah 断裂形成于 ~680 Ma (Stern et al., 2010), 表现出多期活动的特征: 早期为右

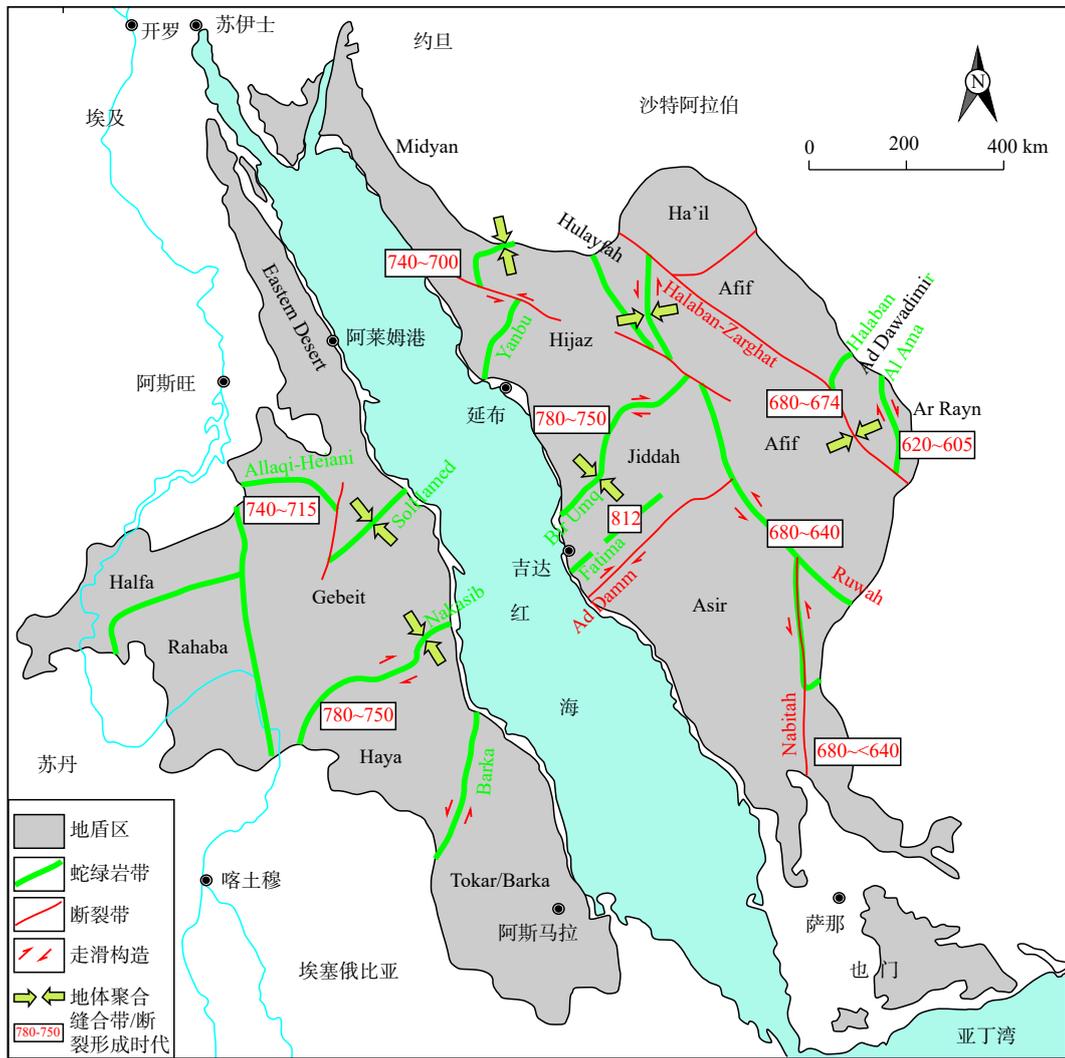
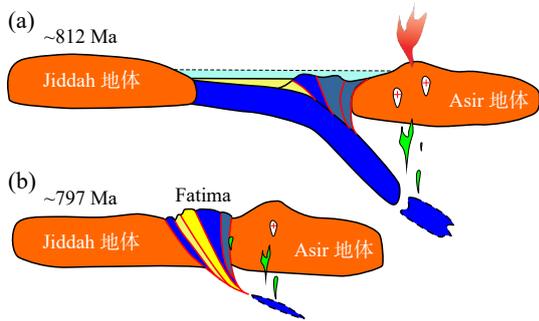


图3 阿拉伯-努比亚地盾构造背景及缝合带和断裂带对比图(据 Stern et al., 2010; Abd-Allah et al., 2014 修改)

Fig. 3 Tectonic setting of the Arabian-Nubian Shield showing the comparison of sutures and faults



a. Fatima 蛇绿岩形成; b. Jiddah 和 Asir 地体碰撞形成增生楔

图4 Fatima 缝合带形成过程示意图

(据 Abd-Allah et al., 2014)

Fig. 4 Schematic cartons showing formation of Fatima suture zone

旋走滑,发育右旋走滑拉分盆地;晚期发育左行走滑构造(图 1b),可能是 Najd 左行走滑断裂系的一部分

(Agar, 1987; Matsah et al., 2001; Divi et al., 2001), 年代学限定其运动时限为 625~576 Ma。

### 2.4 新元古代沉积盆地

普遍发育于这些次级地体上的新元古代火山-碎屑沉积岩(Johnson et al., 2003a; Bamousa, 2013), 与下伏变质岩常呈不整合接触关系, 构成了一系列规模不等的沉积盆地(图 1b), 记录了地体拼合后丰富的地质演化信息, 对理解碰撞造山后沉积-构造过程具有重要意义。然而, 这些新元古代地层常常在不同地区或盆地拥有不同的名称, 而且多数缺少系统的年代学约束, 导致这些盆地间难以进行地层对比, 造成了现有地层资料的混乱和困扰。如 Murdama 群(670~650 Ma)广泛分布在 Maraghan、Mushrifah、Urayk、Salam 及 Maslum 盆地等, 与绿片岩-角闪岩相及局部麻粒岩相的变质

火山岩或侵入体呈区域、角度不整合接触(Cole, 1988),地层厚度可达8 000 m(Johnson et al., 2003a),由砂岩、砾岩、粉砂岩、灰岩及火山岩组成。该套地层在Maslum盆地,被称为At Tuwawiyah组,认为是一套火山弧性质的火山-碎屑岩组合;而在Maraghan盆地Murdama群又被称为Farida组,为一套泄湖或浅海相沉积(Wallace, 1986)。

类似地,Jibalah群(又称为“J'Balah”或“Jubaylah”)主要出露在与Najd断裂相邻的小型拉分盆地中(如Al Kibdi、Al Jifn、Antaq盆地)。在Al Kibdi盆地出露的Jibalah群与Siham弧呈不整合和断层接触,岩性主要为玄武岩、安山岩、复成分砾岩、砂岩、粉砂岩、页岩和薄层灰岩等,指示浅水环境,可能为沿断裂分布的局限性湖盆(Johnson et al., 2003a)。在Ha'il地体的Jibalah盆地又被命名为Hibshi组(632±5 Ma),为后碰撞沉积盆地(Harbi et al., 2016),沉积序列以与Jurdhawiyah群相关的火山岩、火山碎屑岩和表壳岩为主(Johnson et al., 2003a)。

### 3 构造演化与成矿作用

阿拉伯地盾的多地体特征及新元古代蛇绿构造混杂岩带研究结果表明,“阿拉伯地盾”并非传统意义的古老地盾,而是新元古代新生的洋内弧及局部存在的古老陆壳碎片,具有典型的增生型造山带特征。根据地质历史过程中的演化特征,大致可划分为4个构造演化阶段。

#### 3.1 Mozambique 洋演化阶段

阿拉伯地盾不同类型的地体形成于Rodinia超大陆裂解的大陆碎片和Mozambique洋演化过程中的新生洋内弧(Abd-Allah et al., 2014),并于约870 Ma开始由西向东陆续汇聚,形成西部核心地体,伴随着洋盆的最终闭合(630~600 Ma)(Stern et al., 2010; Abd-Allah et al., 2014),形成阿拉伯-努比亚地盾,从而完成东、西Gondwana碰撞并形成东非造山带,碰撞造山导致地壳加厚并发生构造逃逸(600~550 Ma)。

关于阿拉伯地盾整体构造拼贴模式,目前还没有统一的认识。研究认为,地盾西部洋内弧间的Bir Umq-Nakasib弧-弧缝合带标志着汇聚作用的开始(约780 Ma)(Johnson et al., 2003b; Abd-Allah et al., 2014)。几乎同时,Asir地体与西部地体拼合(Abd-Allah et al., 2014)(图4),形成最初的阿拉伯-努比亚核

心地体(包括Hijaz、Jiddah、Asir等)。Afif地体与西部弧地体于640 Ma前碰撞形成了Nabitah造山带,Mozambique洋沿着地盾东缘Al Amar构造带发生洋壳俯冲并最终闭合(620~600 Ma)。东部,在Ar Rayn地体发育的同碰撞或后碰撞侵入体(607~583 Ma),也表明俯冲带以东的陆块(东Gondwana大陆)与Ar Rayan弧地体距离较近(图2)(Doeblich et al., 2007)。

伴随着新元古代的汇聚事件,阿拉伯地盾发育多期与成矿效应密切相关的岩浆事件(Helmy et al., 2001; Johnson et al., 2011; Surour et al., 2013; Sillitoe et al., 2017; Gahlan et al., 2023)。其中,俯冲岩浆弧(>689~615 Ma)形成Pb-Zn-Ag-Cu多金属矿(Sangster et al., 2005; 向文帅等, 2022; 朱清等, 2023); 650~630 Ma,碰撞挤压到后碰撞伸展转换期的钙碱性闪长岩和花岗闪长岩形成Au-Ag-Cu矿化,以及与弧岩浆作用相关的斑岩型、VMS型矿床成矿效应明显(Johnson et al., 2011; Harbi et al., 2014; 向文帅等, 2022)。此外,在西部蛇绿构造混杂岩带常形成与蛇绿岩相关的铬铁矿(Ahmed et al., 2012; Ahmed et al., 2015; Habtoor et al., 2017),而碰撞期和后造山期沿Najd剪切带形成区内韧性剪切带型金矿(Surour et al., 2014)等。

#### 3.2 新元古代裂谷盆地演化阶段

地体碰撞拼合,随之发生了新元古代末期广泛的陆内伸展(590~540 Ma)和地壳减薄,发育双峰式岩浆岩和岩墙群(Genna et al., 2002),形成一系列受伸展构造控制的盆地(如Bani Ghayy、Jurdhawiyah、Hibshi等盆地),可能为造山期后的地壳坍塌事件形成的伸展盆地(Johnson et al., 2003)。这些新元古代沉积盆地的发育常伴有密集的火山作用,并形成与火山作用相关的块状硫化物Cu-Pb-Zn矿床(Surour et al., 2013)、浅成低温热液型金矿(Zoheir, 2008; Harbi et al., 2014; 魏浩等, 2015),以及地盾北西部的沉积型条带状磁铁矿(BIF)(约750 Ma)等(Stern et al., 2013)。后碰撞伸展阶段的成矿作用明显受控于岩浆演化过程,即随着岩浆演化的进行形成不同的成矿系列,如与碱性-过碱性花岗岩(约630 Ma)有关的Mo-W-Bi-Sn矿(Kamilli et al., 1996; Mahdy et al., 2015; Gahlan et al., 2022);与A型花岗岩(620~530 Ma)密切相关的Nb-Zr-REE-Ta矿床和铀矿化(Stoeser et al., 1980; Küster, 2009; Mahdy et al., 2015; Howari et al., 2016; Gahlan et al., 2023)。

阿拉伯板块古生代地层主要发育在地盾的东缘及西北部(Laboun, 2013),发育连续、完整的寒武纪—二叠纪地层,形成巨厚的碳酸盐岩—泥沙质沉积体(Horton et al., 2008),揭示自约 500 Ma 开始区域长期处于相对稳定的被动大陆边缘环境(吴福元等, 2020)。

### 3.3 新特提斯洋演化阶段

至三叠纪,位于匈奴地块与基梅里陆块之间的古特提斯洋盆(380~250 Ma,相当于 Rheic 残留洋)闭合(吴福元等, 2020; Metcalfe, 2021),Pangea 超大陆形成,阿拉伯—努比亚板块演化为东侧特提斯洋被动陆缘的一部分(Zhao et al., 2018)。随后,基梅里大陆从冈瓦纳大陆裂离,伴随着新特提斯洋的打开。

约 180 Ma, 先前形成的岩浆弧裂解在中,伊朗地块南缘形成新特提斯洋(吴福元等, 2020)。直至约 30 Ma, 阿拉伯板块与欧亚板块碰撞形成扎格罗斯(Zagros)造山带(图 1a),在周缘形成宽阔的前陆褶皱带(Agard et al., 2011),区域上发育北西向平行展布的褶皱—断裂带,提供了优越的油气圈闭的构造条件;该构造带东延至青藏高原南部,新特提斯的残迹即印度河—雅鲁藏布江缝合带,大约在 60~50 Ma 发生陆—陆碰撞(鲍佩声等, 2015),标志着新特提斯洋的闭合。

### 3.4 红海裂谷演化阶段

新特提斯的关闭也伴随着新的洋盆开启。约 30~25 Ma, 红海—亚丁湾开始打开,阿拉伯板块从非洲板块裂离,成为独立的板块(Stern et al., 2010)(图 3)。平行红海海岸线发育一系列辉长岩—石英脉等岩脉、基性岩墙(30~20 Ma)、亚碱性—碱性玄武质火山岩(常发育地幔岩包体)(Muricia et al., 2014; Duncan et al., 2016),代表了地壳减薄和持续伸展、地幔物质上涌的产物。约 13 Ma 以后,沿南北向发育了过渡型—强碱性熔岩,岩石组合则主要为碱性玄武岩、碧玄岩和少量拉斑玄武岩。

阿拉伯地盾区新生代赋存有沉积型磷矿、铁矿、铀矿、石英砂、膏岩等矿床(Dawood et al., 2022)。这些矿床的形成不仅与火山活动相关,还可能与前寒武系含矿物质遭剥蚀后再次沉积和富集有关。

## 4 存在的关键地质矿产问题及填图工作建议

虽然阿拉伯地盾经历了多个构造演化阶段,但新

元古代 Mozambique 洋演化阶段是其主构造期,形成了地盾区最显著、最深刻的地质印记。作为新元古代增生造山带,阿拉伯地盾记录了 Mozambique 洋打开、洋壳俯冲、地体增生、碰撞造山等构造过程中丰富的地质信息。现今的地质结构表现为由多条蛇绿构造混杂岩带和韧性剪切带分割的多个亚地体结构,大量的研究揭示了地体西部为具有新元古代(850~680 Ma)新生洋内弧属性;而东部地体构成沟—弧—盆体系,并在东部 Khida 亚地体保留了太古代—古元古代的古老陆壳碎片。地体间的构造带记录了各地体拼贴就位过程的重要信息,呈现由西向东拼贴增生的趋势,并于 620~605 Ma 沿 Al Amar 断裂带最终完成东、西冈瓦纳的拼合。

### 4.1 存在的主要地质矿产问题

已有资料显示,前人对阿拉伯地盾的地质结构、构造演化及成矿地质背景等方面进行了大量的调查研究,并取得了一系列重要进展。然而,目前的基础地质调查资料亟待系统更新升级,并进一步细化阿拉伯地盾地质结构和构造演化过程,以服务于沙特阿拉伯王国矿业发展。具体地质—矿产问题可以概况为以下 4 个方面。

(1)阿拉伯地盾新元古代地层单位的名称尚不统一,部分地层单位(>18 个群/组)仍缺少精确的年代学约束和系统厘定,不便于区域地层对比。因此,亟待建立和完善阿拉伯地盾区前寒武纪岩石地层统一的地层格架。

(2)阿拉伯地盾实质可能更接近与新元古代增生造山带,目前对各地体的属性的认识还存在争议,尚未精细限定各地体形成演化及拼贴就位过程,从而制约了对泛非造山作用过程的深刻认识。一方面是地体自身的演化(亲缘关系、年代学、同位素特征等)约束不够;另一方面是对各构造带(蛇绿岩、剪切带)的变形—变质条件、冈瓦纳大陆拼合过程的认识还比较局限。

(3)新元古代是阿拉伯地盾重要的成矿期。伴随着地体的汇聚拼合,发生一系列侵入、喷发岩浆作用,形成了重要的矿产资源,然而成矿机理仍不清楚。例如,火山成因类型、形成环境如何控制铜—铅—锌块状硫化物矿床成矿?成冰纪—埃迪卡拉纪大规模碱性—过碱性 A 型花岗岩的岩石成因及稀有元素矿床的成矿机制?新元古代与俯冲—碰撞作用相关的岩浆作用及斑岩型铜矿的成矿潜力等问题均值得关注。

(4)约 30Ma 以来的火山岩的成因及岩石圈减薄机制,特别是火山岩中超镁铁质“包体”和麻粒岩“捕虏体”的来源及分布规律仍需系统调查,地球动力学机制尚待深入研究。

#### 4.2 填图工作的具体建议

针对阿拉伯地盾存在的关键地质矿产问题,对未来精细地质填图提出 4 个方面的建议。

(1)建立和完善阿拉伯地盾前寒武纪岩石地层格架。针对新元古界火山-沉积岩,在火山-沉积岩的分布规律调查的基础上,进行沉积序列和环境分析,系统开展岩石学、年代学、地球化学研究和区域地层综合对比,从而建立和完善区域地层格架。

(2)对新元古代蛇绿构造混杂岩带开展蛇绿构造混杂岩带填图。查明各构造带的结构-构造,建立构造变形样式,系统开展年代学、地球化学研究,限定蛇绿岩带的形成、就位及叠加改造过程;建立综合演化模型,进一步揭示阿拉伯地盾的泛非造山带构造属性,细化演化过程,深化成矿地质背景认识。

(3)重视多元地质数据的综合应用,促进区域矿产勘查和矿业发展。在充分利用遥感、地球化学、地球物理等资料分析的基础上,加强成矿地质条件、控矿要素分析,深化阿拉伯地盾构造-岩浆演化过程、成矿效应和成矿规律的认识。

(4)新生代红海裂谷是板块构造研究的活化石,特别是新生代火山岩中地幔包体对探讨火山岩岩石成因、地球动力学机制及资源-环境效益都具有重要意义。在填图过程中应予以关注。

致谢:论文编写过程中与中国地质调查局武汉地质调查中心李福林高级工程师进行了有益交流和探讨;中国地质调查局成都地质调查中心潘桂棠研究员对本文提出了宝贵意见和建议。作者于此谨致谢忱!

#### 参考文献(References):

鲍佩声,苏犁,王军,等.雅鲁藏布江蛇绿岩[M].北京:地质出版社,2015,1-251.

BAO Peisheng, SU Li, WANG Ju, et al. The Yarlung Zangbo River Ophiolite [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2015, 1-251.

李福林,向文帅,王成刚,等.东北非重要铜金矿产资源分布及赋存形式[J].地质通报,2022,41(1):119-128.

LI Fulin, XIANG Wenshuai, WANG Chenggang, et al. Distribution and occurring state of copper-gold mineral resources in North Africa[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 119-128.

吕鹏瑞.丝绸之路沿线 29 国矿业投资环境评价[M].北京:地质出版社,2019,184-195.

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.

吴福元,万博,赵亮,等.特提斯地球动力学[J].岩石学报,2020,36(6):1627-1674.

WU Fuyuan, WANG Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica*, 2020, 36(6): 1627-1674.

向文帅,赵凯,曾国平,等.东北非 VMS 矿床地质特征及研究进展[J].地质通报,2022,41(1):129-140.

XIANG Wenshuai, ZHAO Kai, ZENG Guoping, et al. Geology of VMS deposits in Northeast Africa and their research progress[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(1): 129-140.

朱清,顾本杰,邹谢华,等.试论中非矿业合作的机遇与挑战[J].西北地质,2023,56(1):174-185.

ZHU Qing, GU Benjie, ZOU Xiehua, et al. On the opportunities and challenges of China-Africa Mining Cooperation[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 174-185.

Abd-Allah A M A, El-Fakharani A, El-Sawy E K, et al. Fatima suture: A new amalgamation zone in the western Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Precambrian Research*, 2014, 249: 57-78.

Abu-Alam T S, Hamdy M H. Thermodynamic modelling of Sol Hamed serpentinite, South Eastern Desert of Egypt: Implication for fluid interaction in the Arabian-Nubian Shield ophiolites[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 99: 7-23.

Abuamarah B A. Petrogenetic evolution of Cryogenian Halaban ophiolite, Saudi Arabia: A fragment of fore-arc oceanic lithosphere mantle[J]. *Lithos*, 2020, 356-356: 1-15.

Agar R A. The Najd fault system revisited; a two-way strike-slip orogen in the Saudi Arabian Shield[J]. *Journal of Structural Geology*, 1987, 9(1): 41-48.

Agard P, Omrani J, Jolivet L, et al. Zagros orogeny: A subduction-dominated process[J]. *Geological Magazine*, 2011, 148(5-6): 692-725.

Ahmed A H, Habtoor A. Heterogeneously depleted Precambrian lithosphere deduced from mantle peridotites and associated chromitite deposits of Al'Ays ophiolite, Northwestern Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 67: 279-296.

Ahmed A H, Harbi H M, Habtoor A. Compositional variations and tectonic settings of podiform chromitites and associated ultramafic rocks of the Neoproterozoic ophiolite at Wadi Al Hwanet, northwestern Saudi Arabia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 56: 118-134.

Bamousa A O. Infracambrian superimposed tectonics in the Late Proterozoic units of Mount Ablah area, southern Asir Terrane,

- Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6: 2035–2044.
- Bezenjani R N, Pease V, Whitehouse M J, et al. Detrital zircon geochronology and provenance of the Neoproterozoic Hammamat Group (Igla Basin), Egypt and the Thalbah Group, NWSaudi Arabia: Implications for regional collision tectonics[J]. *Precambrian Research*, 2014, 245: 225–243.
- Cole J C. Geology of the Aban al Ahmar Quadrangle, Sheet 25F, Kingdom of Saudi Arabia [R]. Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Geoscience Map, 1988, GM 105.
- Cox G M, Foden J, Collins A S. Late Neoproterozoic adakitic magmatism of the eastern Arabian Nubian Shield[J]. *Geoscience Frontiers*, 2019, 10: 1981–1992.
- Cox G. M., Lewis C. J., Collins A. S., et al. Ediacaran terrane accretion within the Arabian-Nubian Shield[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 341–352.
- Dawood Y H, El-Naby H H A. Genesis of Uranyl mineralization in the Arabian Nubian Shield: A review[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 225: 105047.
- Divi R S, Zakir F A, Al-Mishwat. Structural and Metallogenic Framework of the Arabian Shield, the Northern Join Between East and West Gondwana[J]. *Gondwana Research*, 2001, 4(4): 607–608.
- Doeblich J L, Al-Jehani A M, Siddiqui A A. Geology and metallogeny of the Ar Rayn terrane, eastern Arabian shield: Evolution of a Neoproterozoic continental-margin arc during assembly of Gondwana within the East African orogeny[J]. *Precambrian Research*, 2007, 158: 17–50.
- Duncan R, Kent A J R, Thornber C R, et al. Timing and composition of continental volcanism at Harrat Hutaymah, western Saudi Arabia[J]. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 2016, 313: 1–14.
- El-Sawy K E, Masrouhi A. Structural style and kinematic evolution of Al J'fani area, Ad Dawadimi terrane, Saudi Arabia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 150: 451–465.
- Gahlan H A, Azer M K, Al-Hashim M H, et al. New insights and constraints on the late Neoproterozoic post-collisional mafic magmatism in the Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Lithos*, 2023, 436–437: 106989.
- Gahlan H A, Azer M K, Asimow P D, et al. Geochemistry, petrogenesis and alteration of rare-metal-bearing granitoids and mineralized silexite of the Al-Ghurayyah stock, Arabian Shield, Saudi Arabia [J]. *Journal of Earth Science*, 2022, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.P.20220711.1357.002.html>.
- Genna A, Nehlig P, Goff E L, et al. Proterozoic tectonism of the Arabian Shield[J]. *Precambrian Research*, 2002, 117: 21–40.
- Habtoor A M, Ahmed A H, Akizawa N, et al. Chemical homogeneity of high-Cr chromitites as indicator for widespread invasion of boninitic melt in mantle peridotite of Bir Tuluha ophiolite, Northern Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 90: 243–259.
- Hamimi Z, El-Sawy E K, El-Fakharani A. Neoproterozoic structural evolution of the NE-trending Ad-Damm Shear Zone, Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2014, 99: 51–63.
- Harbi H M, Ali K A, Eldougoug A. Geochemistry and U-Pb zircon dating constraints of some plutonic rocks along Bir Tawilah shear zone, central Saudi Arabia: Implication for magma petrogenesis and age of gold mineralization[J]. *Chemie der Erde*, 2016, 76: 309–324.
- Harbi H M, Surour A A, Davidson G J. Genesis of Neoproterozoic Au-bearing volcanogenic sulfides and quartz veins in the Ar Rjum goldfield, Saudi Arabia[J]. *Ore Geology Reviews*, 2014, 58: 110–125.
- Hassan M, Alam T S A, Hauzenberger C, et al. Geochemical signature variation of pre-, syn-, and post-shearing intrusives within the Najd Fault System of western Saudi Arabia[J]. *Lithos*, 2016, 263: 274–291.
- Helmy H M, Mogessie A. Gabbro Akarem, Eastern Desert, Egypt: Cu-Ni-PGE mineralization in a concentrically zoned mafic-ultramafic complex[J]. *Mineralium Deposita*, 2001, 36(1): 58–71.
- Horton B K, Hassanzadeh J, Stockli D F, et al. Detrital zircon provenance of Neoproterozoic to Cenozoic deposits in Iran: Implications for chronostratigraphy and collisional tectonics[J]. *Tectonophysics*, 2008, 451(1-4): 97–122.
- Howari F, Goodell P, Salman A. Metallogenic evolution of Uranium deposits in the Middle East and North Africa deposits[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 114: 30–42.
- Ibrahim E, El-Motaal E A, Lashin A, et al. Faulting intersections and magma-feeding zones in Tihamat-Asir, Southeast Red Sea rift: Aeromagnetic and structural perspective[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2021, 173: 1–9.
- Johnson P R. Post-amalgamation basins of the NE Arabian shield and implications for Neoproterozoic III tectonism in the northern East African orogeny[J]. *Precambrian Research*, 2003a, 123: 321–337.
- 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*, 2003b, 6(3): 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, Stewart I C F. Magnetically inferred basement structure in central Saudi Arabia[J]. *Tectonophysics*, 1995, 245: 37–52.
- 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 of Geology*, 2017, 120(1): 63–76.

- Kamilli R, Criss R E. Genesis of the Silsilah Tin deposit, Kingdom of Saudi Arabia[J]. *Economic Geology*, 1996, 91: 1414–1434.
- Koshnaw R I, Stochili D F, Schlunegger F. Timing of the Arabia-Eurasia continental collision: Evidence from detrital zircon U-Pb geochronology of the Red Bed Series strata of the Northwest Zagros hinterland, Kurdistan region of Iraq[J]. *Geology*, 2019, 47(1): 47–50.
- Küster D. Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian-Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenetic setting and petrogenetic framework [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35: 68–86.
- Laboun A A. Regional tectonic and megadepositional cycles of the Paleozoic of northwestern and central Saudi Arabia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, 6: 971–984.
- Mahdy N M, Kalioubi B A, Wohlgemuth-Ueberwasser C C, et al. Petrogenesis of U- and Mo-bearing A2-type granite of the Gattar batholith in the Arabian Nubian Shield, Northeastern Desert, Egypt: Evidence for the favorability of host rocks for the origin of associated ore deposits [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 71: 57–81.
- Matsah M I M, Kusky T M. Analysis of landsat TM ratio imagery of the Halaban Zarghat fault and related Jifn basin, NE Arabian Shield[J]. *Gondwana Research*, 2001, 4(2): 182.
- Metcalfe I. Multiple Tethyan ocean basins and orogenic belts in Asia[J]. *Gondwana Research*, 2021, 100: 87–130.
- Murcia H, Nemeth K, Moufti M R, et al. Late Holocene lava flow morphotypes of northern Harrat Rahat, Kingdom of Saudi Arabia: Implications for the description of continental lava fields[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 84: 131–145.
- Nawab Z A. Geology of the Al-Amar-Idsas region of the Arabian Shield [M]. Red Sea Commission: Jeddah, Saudi Arabia, 1979, 1–39.
- Robinson F A, Foden J D, Collins A S. Geochemical and isotopic constraints on island arc, synorogenic, post-orogenic and anorogenic granitoids in the Arabian Shield, Saudi Arabia[J]. *Lithos*, 2015, 220–223: 97–115.
- Sangster D F, Abdulhay G J S. Base metal (Cu-Pb-Zn) mineralization in the Kingdom of Saudi Arabia [M]. Saudi Geological Survey (Jeddah), 2005, 1–128.
- Sehsah H, Eldosouky A M, Afandy A H E. Unpaired ophiolite belts in the Neoproterozoic Allaqi-Heiani Suture, the Arabian-Nubian Shield: Evidences from magnetic data[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2019, 156: 26–34.
- Sillitoe R H, Perello J, Creaser R A, et al. Age of the Zambian copperbelt[J]. *Mineralium deposita*, 2017, 52(8): 1245–1268.
- Stacey J S, Hedge C E. Geochronologic and isotopic evidence for early Proterozoic crust in the eastern Arabian Shield[J]. *Geology*, 1984b, 12: 310–313.
- Stacey J S, Stoeser D B, Greenwood W R, et al. U-Pb zircon geochronology and geological evolution of the Halaban-Al Amar region of the Eastern Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1984a, 141: 1043–1055.
- Stern R, Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis[J]. *Earth-Science Review*, 2010, 101: 29–67.
- Stern R J, Mukherjee S K, Miller N, et al. ~750 Ma banded iron formation from the Arabian-Nubian Shield-Implication for understanding Neoproterozoic tectonics, volcanism, and climate change[J]. *Precambrian Research*, 2013, 239: 79–94.
- Stoeser D B, Elliott J E. Post-orogenic peralkaline and calc-alkaline granites and associated mineralization of the Arabian Shield, Kingdom of Saudi Arabia [J]. *Evolution and Mineralization of the Arabian-Nubian Shield*, 1980, 1–23.
- Stoeser D B, Frost C D. Nd, Pb, Sr, and O isotopic characterization of Saudi Arabian shield terranes[J]. *Chemical Geology*, 2006, 226(3–4): 163–188.
- Stoeser D B, Stacey J S. Evolution, U–Pb geochronology, and isotope geology of the Pan-African Nabitah orogenic belt of the Saudi Arabian shield. In: El-Gaby, S., Greiling, R. O., *The Pan-African Belt of Northeast Africa and Adjacent Areas* [M]. Vieweg and Sohn, Braunschweig/Weisbaden, 1988, 227–288.
- Surour A A, Bakhsh R. Microfabrics and microchemistry of sulfide ores from the 640 FW-Elevel at the Al Amar gold mine, Saudi Arabia Adel[J]. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 2013, 1: 96–110.
- Surour A A, Harbi H M, Ahmed A H. The Bi'r Tawilah deposit, central western Saudi Arabia: Supergene enrichment of a Pan-African epithermal gold mineralization[J]. *Journal of African Sciences*, 2014, 89: 149–163.
- Vaslet D, Manivit J, Le Nindre Y, et al. Geologic map of the Wadi Ar Rayn quadrangle, sheet 23H, Kingdom of Saudi Arabia. Saudi Arabian Deputy Ministry of Mineral Resources Geoscience Map [R], 1983, GM-63A.
- Wallace C A. Lithofacies and Depositional Environment of the Maraghan Formation, and Speculation on the Origin of Gold in Ancient Mines, an Najadi area, Kingdom of Saudi Arabia [R]. Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Open-File Report, 1986, USGS-OF-06-6.
- Whitehouse M J, Stoeser D B, Stacey J S. The Khida Terrane-Geochronological and isotopic evidence for Paleoproterozoic and Archean crust in the eastern Arabian shield of Saudi Arabia[J]. *Gondwana Research*, 2001, 4: 200–202.
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, et al. Geological reconstruction of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth Science Reviews*, 2018, 186: 262–286.
- Zoheir B A. Structural controls, temperature–pressure conditions and fluid evolution of orogenic gold mineralisation at the Betam mine, south Eastern Desert, Egypt[J]. *Mineralium Deposita*, 2008, 43(1): 79–95.