

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.115>



伊朗大理矿区中新世成矿及无矿斑岩地球化学对比 及其对成矿的启示

赵苗¹, 杨竹森¹, 张洪瑞²

1. 中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

摘要: 伊朗乌尔米耶—达克塔尔弧岩浆带(Urumieh-Dokhtar magmatic arc, UDMA)是特提斯域最重要的斑岩铜矿省, 发育大量中新世大型超一大型斑岩铜矿床; 同时, 该带也发育大量同时代无矿岩体, 但控制岩体成矿潜力的关键因素尚不清楚。为此, 选择该带中段、成矿及无矿岩体同时发育的大理矿区, 针对成矿及无矿岩体开展了系统的锆石岩相学、年代学、微量元素地球化学及 Hf 同位素地球化学对比。结果显示, 无矿闪长岩(锆石 U-Pb 年龄: 17.4 ± 0.3 Ma)比成矿石英闪长斑岩(锆石 U-Pb 年龄: 15.6 ± 0.1 Ma)形成略早, 但近乎同期; 闪长岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化介于 $+2 \sim +4$, 石英闪长斑岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化介于 $+2 \sim +5$, 两者具有类似的 Hf 同位素组成; 闪长岩中锆石常含老的继承核($172 \sim 920$ Ma), 石英闪长斑岩则不发育继承锆石; 闪长岩及石英闪长斑岩中的中新世锆石具有类似的稀土配分模式, 且 Eu 负异常不明显, 而闪长岩中的锆石继承核则显示出明显的 Eu 负异常, 配分模式与中新世锆石不同。基于上述结果, 我们提出大理矿区的两套中新世岩体具有相同的岩浆源区, 但经历了不同的地壳演化过程, 成矿的石英闪长斑岩浆形成后, 与古老地壳没有明显交互, 而无矿的闪长岩浆, 在上升过程中与地壳物质、特别是古老还原性物质发生了交互, 交互过程中岩浆氧逸度降低, 是该套岩浆不成矿的主要原因。进而我们提出 UDMA 带中段斑岩成矿与否不仅与前人所认为的受岩浆源区控制, 也与岩浆演化过程密不可分。

关键词: 伊朗; 乌尔米耶—达克塔尔弧岩浆带; 大理; 斑岩铜矿; 岩浆演化; 岩石学。

中图分类号: P597; P611

文章编号: 1000-2383(2019)06-2187-10

收稿日期: 2019-03-26

Geochemical Constraints on Fertile and Infertile Miocene Magmatic Suite in Dalli Area, Iran and Its Insights for Metallogeny

Zhao Miao¹, Yang Zhusen¹, Zhang Hongrui²

1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: The Urumieh-Dokhtar magmatic arc (UDMA), hosting three giant and six large Miocene porphyry copper deposits, is the most important post collisional porphyry belt in the Tethyan domain. In the UDMA belt, there are also abundant coeval barren porphyry intrusions, but the factors controlling fertility of Miocene porphyry intrusions in the belt remains enigmatic. The Dalli deposit, located in the central segment of UDMA, contains both fertile and barren Miocene intrusions. In this study, we report zircon petrography, geochronology, trace element geochemistry and Hf isotopic compositions for the barren diorite and

基金项目: 国家重点研发计划(No.2016YFC0600306); 国家自然科学基金重点项目(No.91855214); 自然科学基金项目(No.41772088); 中国地质调查局项目(No.DD20190001)。

作者简介: 赵苗(1990—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事岩浆岩相关矿床研究。ORCID: 0000-0001-7877-7766. E-mail: zhaomiao@cags.ac.cn

引用格式: 赵苗, 杨竹森, 张洪瑞, 2019. 伊朗大理矿区中新世成矿及无矿斑岩地球化学对比及其对成矿的启示. 地球科学, 44(6):2187—2196.

mineralization-related quartz diorite porphyry at Dalli. The results show that the diorite has inherited zircon cores overgrown by new zircons, whereas quartz diorite only has one type of zircon. The diorite yields a zircon U-Pb age of 17.4 ± 0.3 Ma, which is slightly older than the quartz diorite porphyry (zircon U-Pb: 15.6 ± 0.1 Ma), and the inherited zircon cores yielded as zircon U-Pb of 172–920 Ma. Both the diorite and quartz diorite porphyry show slightly positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values, which are respectively +2–+4 and +2–+5. Miocene zircons from both diorite and quartz diorite porphyry are characterized by obviously positive Ce anomalies and slightly depleted Eu anomalies. However, the inherited zircon cores exhibit more depleted Eu anomalies, suggesting low oxygen fugacity. These results suggest that the barren diorite possibly interacted with ancient crust, particularly with reduced material, which subsequently decreased magma oxygen fugacity whereas the fertile quartz diorite porphyry emplaced without such material exchange. On the basis of above observations, we propose magma process may be the first order of key factors controlling the fertility of intrusions in the central segment of the UDMA.

Key words: Iran; Urumieh-Dokhtar magmatic arc; Dalli; porphyry copper deposits; magma evolution; petrology.

0 前言

扎格罗斯造山带位于伊朗中西部, 主要由 4 个平行的北西—南东向的构造单元组成(图 1a)分别为: 扎格罗斯褶皱冲断带(Zagros fold-and-thrust belt, ZFTB)、萨南达杰—锡尔詹中生代岩浆变质带(Sanandaj-Sirjan metamorphic zone, SSMZ)、乌尔米耶—达克塔尔新生代火山岩浆带(Urumieh-Dokhtar magmatic arc, UDMA)和伊朗中部地块(Central Iran, CI)(Agard *et al.*, 2011). 其中, UDMA 带发育有大量世界级规模的斑岩 Cu±Mo±Au 矿床(Shafiei *et al.*, 2009; Zaravandi *et al.*, 2015a), 铜的总储量已超过 3 000 万 t(Aghazadeh *et al.*, 2015).

UDMA 带内目前已知的大型、超大型斑岩铜矿床主要集中分布在北西和南东段(图 1a), 其中北西段发育有 Sungun 超大型(铜储量: 527 万 t, 铜平均品位: 0.62%)、Masjed Daghı 大型(铜储量: 92 万 t, 铜平均品位: 0.27%)矿床, 而南东段则发育 Sar Cheshmeh(铜储量: 720 万 t, 铜平均品位: 0.6%)及 Meiduk(铜储量: 400 万 t, 铜平均品位: 0.8%)2 个超大型、Darreh Zar(铜储量: 171 万 t, 铜平均品位: 0.36%)等 5 个大型斑岩铜矿床(Aghazadeh *et al.*, 2015). 与之相比, UDMA 带中段目前却鲜有大型、超大型斑岩铜矿床的产出. Haschke *et al.*(2010)通过 UDMA 带中段俯冲及后碰撞阶段岩浆岩地球化学特征的对比研究, 提出导致 UDMA 带中段斑岩铜矿不发育的主要原因是该段富硫及金属的弧根在碰撞时(21~19 Ma)发生了拆离而进入了软流圈, 后碰撞阶段地幔起源的斑岩岩浆上升过程失去与此种富硫及金属的弧根发生交互并富集金属及硫的机会, 从而导致该段后碰撞的斑岩岩浆成矿潜力较小. 尽管该模式可以解释 UDMA 带后碰撞斑岩在区域尺

度上的成矿潜力差异, 但很难解释矿区尺度同时代后碰撞斑岩的成矿潜力差异. 比如, 在 UDMA 带中段新发现的大理(Dalli)斑岩 Cu-Au 矿区(矿石量: 8 Mt, Cu 和 Au 的品位分别为 0.5% 和 0.75 g/t; Zaravandi *et al.*, 2015b), 同为中新世的两套斑岩, 却显示出截然不同的矿化差异: 一套具有较好的成矿潜力, 为大理矿床的致矿斑岩; 而另一套却没有显示出任何的矿化线索. 为查明导致两套同时代斑岩成矿潜力截然差异的原因, 约束控制 UDMA 带中段斑岩成矿与否的关键因素, 本研究对大理矿区的两套斑岩开展了锆石岩相学、U-Pb 年代学、微量及 Hf 同位素特征调查.

1 区域地质

UDMA 带位于特提斯域西部, 夹持于萨南达杰—锡尔詹带(SSMZ)和伊朗中部地块(CI)中间, 为一条长约 2 000 km 北西—南东向的新生代火山岩浆带(Alavi, 2004; Ghasemi and Talbot, 2006). 带内主要经历三期岩浆活动, 分别为始新世、渐新世—中新世和上新世(Waterman and Hamilton, 1975; Hezarkhani *et al.*, 1998; Zaravandi *et al.*, 2007; 张洪瑞和侯增谦, 2015), 主要发育与新特提斯洋闭合相关的钙碱性岩浆岩(Chiu *et al.*, 2013). 始新世主要由玄武安山岩和少量花岗岩组成; 渐新世—中新世发育大量埃达克质斑岩体; 上新世发育超钾质岩石和碱性熔岩(Mirnejad *et al.*, 2010; Chiu *et al.*, 2013). 其中新世的花岗闪长岩、石英二长岩等与斑岩型矿床关系更为紧密(Afshooni *et al.*, 2013). 带内构造形迹以断裂为主, 主要发育北西向及北东向网格状断层(Morley *et al.*, 2009); 另发育 Deshir Fault 右行走滑断层(Meyer *et al.*, 2006).

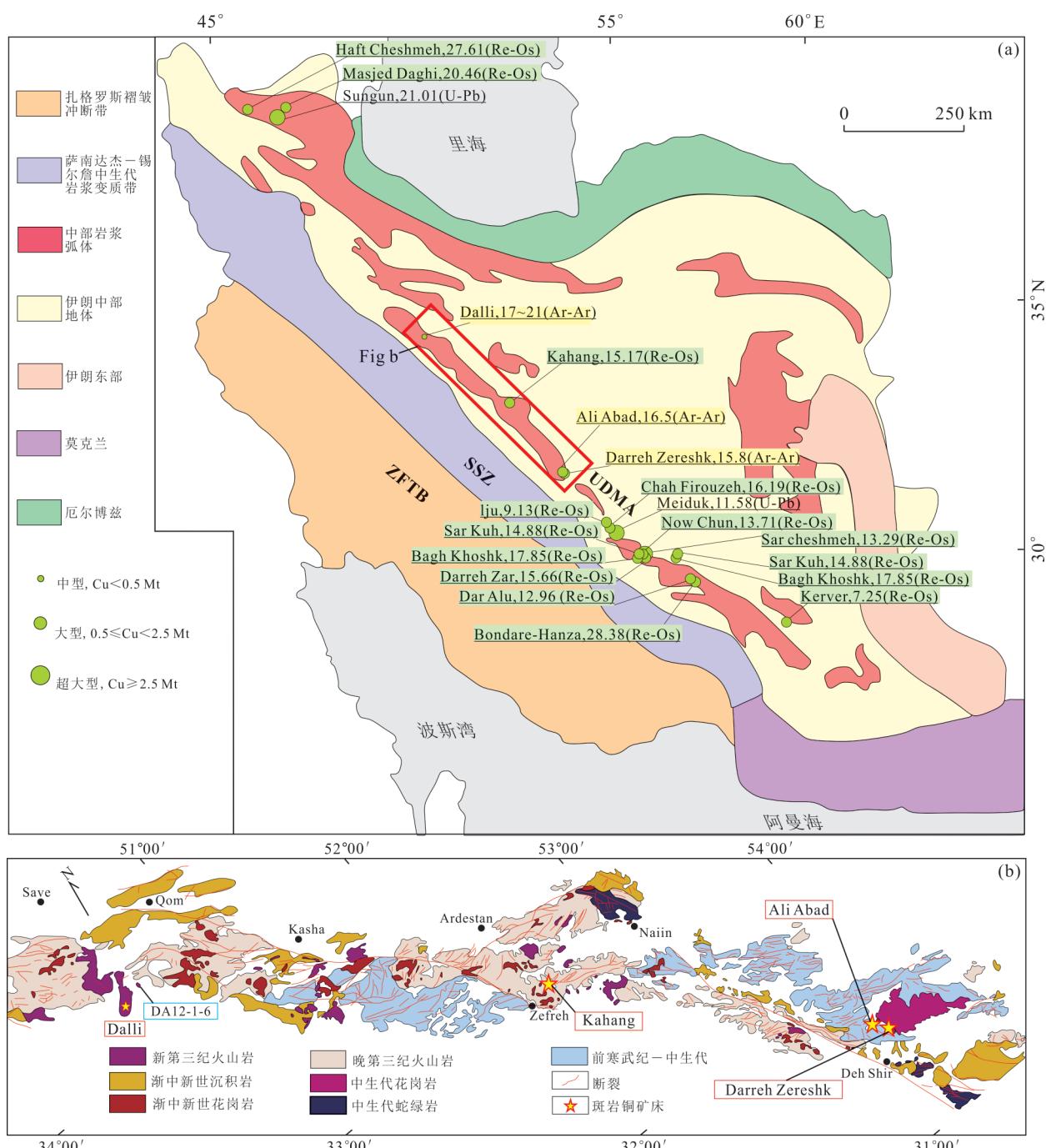


图1 伊朗UDAM带斑岩铜矿床分布及萨韦—亚兹德斑岩铜矿带(Saveh-Yazd porphyry copper belt, SYPCB)区域地质图

Fig.1 Location of major porphyry Cu deposits and regional geologic map of Saveh-Yazd porphyry copper belt

a. 据 Zaravandi *et al.* (2005), Boomeri *et al.* (2010), Ayati *et al.* (2013), Aghazadeh *et al.* (2015)修改; b图据 Aghazadeh *et al.* (2015)修改

在UDAM带中部,发育萨韦—亚兹德斑岩铜矿带(Saveh-Yazd porphyry copper belt, SYPCB),其夹持于萨韦和亚兹德两个城市之间,主要发育古生代沉积岩基底、中生代沉积岩以及大量新生代火山岩和岩浆岩(图1b).带内发育Dalli(大理)、加亨(Kahang)、阿里阿巴德(Ali Abad)、Darreh Zereshk

等斑岩铜矿床.前人对区域内矿床进行了年代学研究,成矿时代分别为17~21 Ma (Ar-Ar)(Ayati *et al.*, 2013)、15.17 Ma (Re-Os)(Aghazadeh *et al.*, 2015)、16.5 Ma (Ar-Ar)(Zaravandi *et al.*, 2005)和15.8 Ma (Ar-Ar)(Zaravandi *et al.*, 2005),指示中新世为带内的主要成矿时代.

2 矿区地质

大理斑岩矿床(50.32°E , 34.27°N)位于萨南达杰—锡尔詹中生代岩浆变质带(SSMZ)东侧,富矿岩体呈北东向平行于扎格罗斯造山带断续展布,由相距 1.7 km 的南矿区和北矿区组成。矿区中出露的最老地层为一套中新世的红色泥灰岩,伴有砂岩、砾岩、石膏互层;上部被中新世安山质—安山玄武质熔岩、安山质一流纹英安质碎屑岩覆盖;这套火山岩被后期岩体切穿,主要包括闪长岩、石英闪长斑岩、花岗闪长岩、安山岩枝等。其中南矿区出露的蚀变石英闪长斑岩切穿渐中新世闪长岩及始新世安山岩;北矿区的蚀变石英闪长斑岩切穿渐新世斑状安山岩,并被后期新鲜的花岗闪长岩侵入出露地表。

前人根据其矿物共生组合,对矿区划分了蚀变区域(图2),主要包括钾化带(钾长石—石英—黑云母—磁铁矿)、青磐岩化带(绿帘石—绿泥石一方解石)、绢英岩化带(石英—绢云母—绿泥石)、泥化带(石英—钠长石—蒙脱石—高岭土)(Ayati *et al.*, 2015b),

2013).钾化主要发育在矿区石英闪长斑岩及北矿区斑状安山岩中,外围叠加的泥化蚀变及绢英岩化蚀变分别在闪长岩及南矿区石英闪长斑岩中发育;而青磐岩化主要发育在矿区钾化带、绢英岩化外围的安山岩及斑状安山岩中。南矿区出露矿体为闪长岩、石英闪长斑岩,具有矿化强、品位高的特点,出露面积为 $190 \times 180\text{ m}^2$;北矿区出露矿体为石英闪长斑岩和斑状安山岩,出露面积为 $250 \times 400\text{ m}^2$ 。矿化以浸染状、脉状、团块状的黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、自然金和少量斑铜矿、辉铜矿组成。根据矿物共生组合,划分为3个阶段,分别为Ⅰ成矿前阶段(石英—钾长石—磁铁矿—黄铜矿),与钾硅酸盐化蚀变密切相关,并发育无矿石英脉;Ⅱ矿化阶段(石英—黄铁矿—黄铜矿—斑铜矿—铜蓝—方解石),主要发育在钾化带以及叠加钾硅酸盐化的绢英岩化带中;Ⅲ成矿后阶段(石英—绿泥石—黑云母)(Zarasvandi *et al.*, 2015b)。

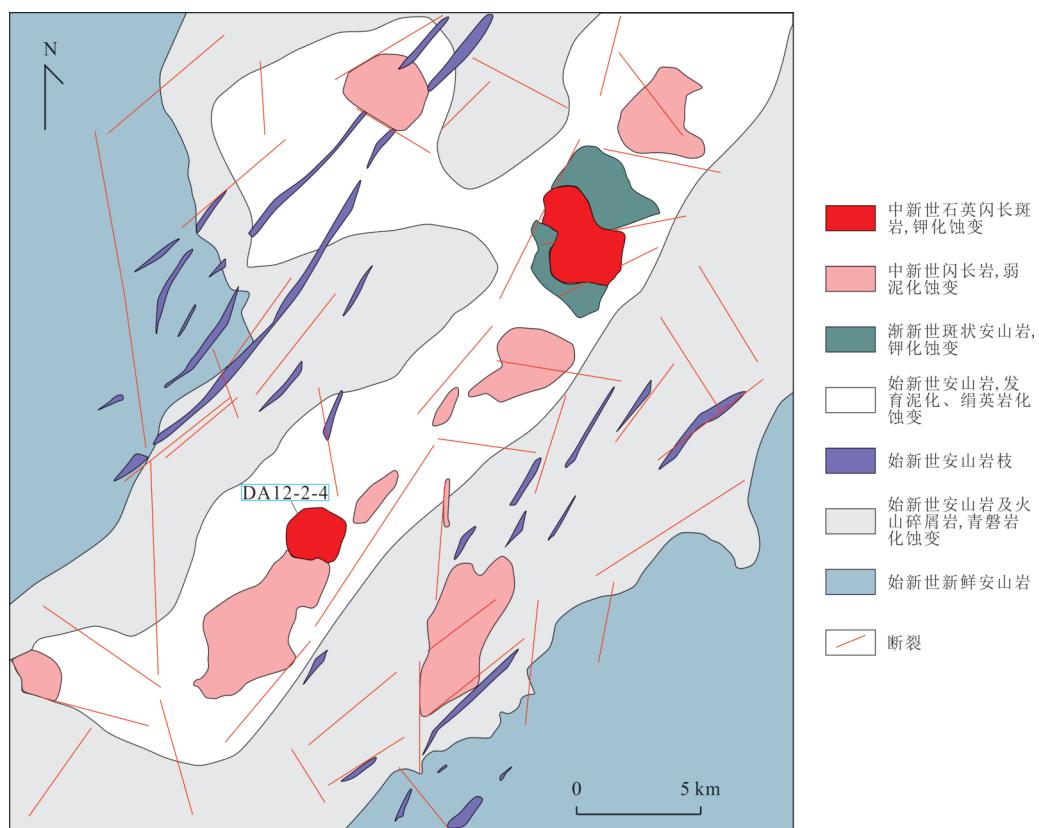


图2 伊朗UDMA中段大理矿区地质图

Fig.2 Geological map of the Dalli area in middle part of UDMA belt in Iran

据 Ayati *et al.*, 2013(修改)

3 样品特征及分析方法

本次用于锆石U-Pb定年及Hf同位素研究的样品采自Dalli南矿区中的蚀变石英闪长斑岩(DA12-2-4)以及矿区北部新鲜闪长岩(DA12-1-6)中。样品经过破碎,重、磁方法分离出锆石颗粒,使用双目镜人工挑选出晶形、色泽较好、透明度较高的锆石颗粒进行制靶。在分析之前通过比对锆石反射光、透射光及阴极发光图像(CL),规避包裹体、裂隙,选择合适的位置进行U-Pb定年及Lu-Hf同位素测试。

锆石阴极发光图像(CL)在北京离子探针中心使用HITHCH S-3000N型扫描电镜及GEOL Gatan Chroma阴极发光仪完成(图3)。锆石U-Pb定年以及微量元素含量分析在中国地质科学院地质研究所矿物/包裹体微区分析实验室进行,激光剥蚀平台使用美国NWR193^{UC}型193 nm深紫外激光剥蚀进样系统,质谱仪采用Agilen 7900型电感耦合等离子质谱仪。应用高纯He作为载气、5 Hz激发频率、2.5 J/cm²激光束能量、30 μm束斑,使用NIST SRM610、国际标准锆石91500及GJ-1作为外标,测得91500和GJ-1加权平均年龄分别为1 062.1±3.1 Ma($n=19$, MSWD=0.74)、603.6±4.5 Ma($n=10$, MSWD=4.8)。具体流程见于超等(2019)。锆石Hf同位素测试在中国科学院地质与地球物理研究所

多接受-电感耦合等离子体质谱实验室(MC-ICP-MS)完成。采用Thermo-Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及193 nm波长ArF准分子激光剥蚀系统,分析过程中采用8 Hz脉冲频率、60 μm激光束斑,通过标准锆石GJ-1和Mud进行仪器监控和样品矫正,获得的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值分别为0.282 011 3±0.000 003 1($n=152$, 2σ)和0.282 503 5±0.000 002 3($n=179$, 2σ)。具体分析流程见Wu et al.(2006)。

4 测试结果

4.1 锆石U-Pb年龄

石英闪长斑岩(DA12-2-4)中的锆石形态多呈长柱状,个别呈短柱状,自形一半自形,晶体长轴介于200~400 μm,长短轴比值介于2:1~5:1(图3)。CL图像显示锆石均呈灰黑色,发育清晰的振荡环带,部分可见核-幔结构,核部相对于边部颜色均匀,边界形状相似。锆石Th/U比值介于0.40~1.27,均大于0.1,具有岩浆锆石的特征(Hoskin and Black, 2002)。与之相比,闪长岩(DA12-1-6)中的锆石形态呈半自形-他形柱状,晶体长轴介于100~300 μm,长短轴比值介于1:1~3:1(图3)。锆石CL图像显示锆石呈灰白色,发育较清晰的振荡环带,部分锆石发育核-幔结构,继承核具有再吸收结构,边部色调较浅。锆石Th/U比值介于0.32~0.84,

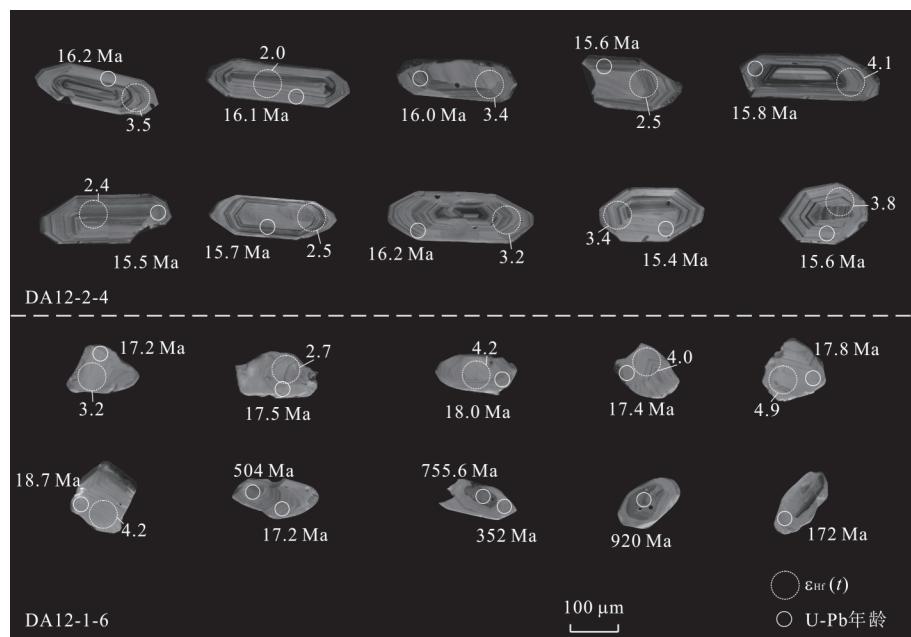


图3 大理矿区石英闪长斑岩(DA12-2-4)及闪长岩体(DA12-1-6)锆石阴极发光电子(CL)图像

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images of zircons of the quartz diorite porphyry (DA12-2-4) and diorite (DA12-1-6) in Dal-li mining area

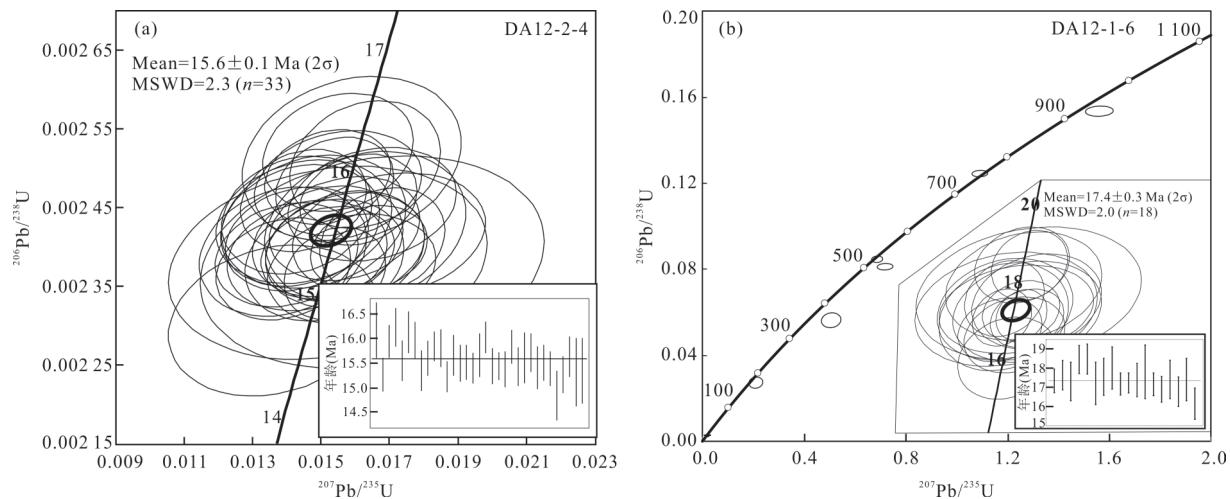


图4 大理矿区石英闪长斑岩(DA12-2-4)及闪长岩体(DA12-1-6)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb LA-ICP-MS concordia diagrams for the quartz diorite porphyry and diorite in the Dalli district, Iran

均大于 0.1,也符合岩浆锆石的特征(Hoskin and Black, 2002).石英闪长斑岩及闪长岩的锆石 U-Pb 分析结果见附表 1 及图 4.

石英闪长斑岩的 36 个锆石点中 9 个点位于核部,其余点位均在边部,结果显示 3 个点谐和度较低,剩余 33 个锆石点使用 Isoplot 4.15 计算谐和年龄和加权平均年龄,所有数据分析点均在谐和曲线上或其附近,谐和年龄为 15.6 ± 0.1 Ma ($n=33$, MSWD=1.2),核部和边部年龄并无明显差别,加权平均模式年龄为 15.6 ± 0.1 Ma($n=33$, MSWD=2.3),代表了石英闪长斑岩的成岩年龄(图 4).

闪长岩中的锆石继承核显示出较老的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,包括 172 Ma、352 Ma、504 Ma、523.7 Ma、755.7 Ma 和 920 Ma.除 352 Ma 对应的点以外,其余锆石点的谐和度较高,介于 90%~110%.闪长岩中的其他锆石,年龄主要介于 16.1~

20.1 Ma,由于该样品 ^{207}Pb 信号强度较低,导致 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 比值波动较大,其中,12 个分析点谐和度低(表 1).剔除上述 12 个谐和度较低的分析点后,剩余 18 个谐和度较高分析点给出了 17.4 ± 0.2 Ma ($n=18$, MSWD=0.17) 的谐和年龄,与加权平均模式年龄(17.4 ± 0.3 Ma; $n=18$, MSWD=2.0)一致,代表了闪长岩的结晶年龄(图 4).

4.2 锆石微量元素

石英闪长斑岩及闪长岩样品的锆石微量元素分析结果见附表 2.石英闪长斑岩中的锆石呈现较为一致的稀土配分模式,主要表现为重稀土富集($\text{Lu}/\text{Gd}=19\sim68$)、明显的 Ce 正异常及弱的 Eu 负异常等特征(图 5).该样品锆石的 Ti 含量变化介于 3.1×10^{-6} ~ 18.5×10^{-6} ,计算的结晶温度变化介于 650~808 °C (Watson *et al.*, 2006).

闪长岩中的中新世锆石及继承锆石呈现明显

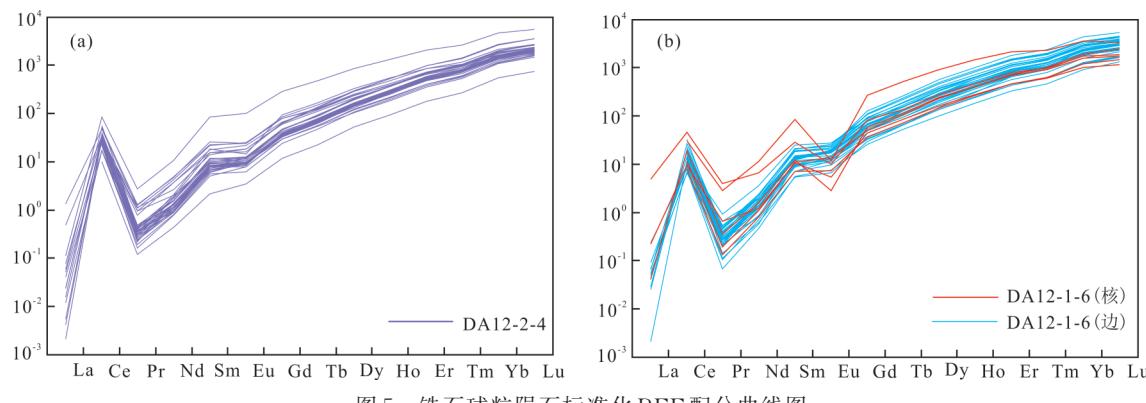


图5 锆石球粒陨石标准化REE配分曲线图

Fig.5 Chondrite-normalized REE content diagrams of zircon

球粒陨石 REE 数据据 Sun and McDonough(1989); Burnham and Berry(2012)

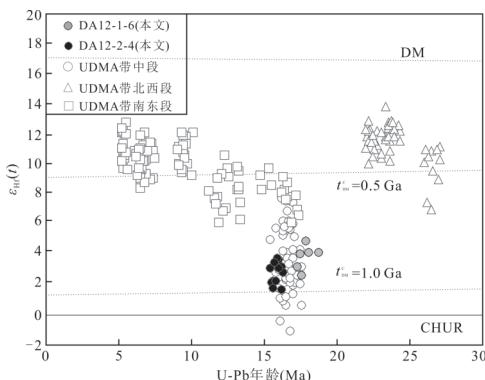
图6 伊朗UDMA带锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -U-Pb年龄图解

Fig.6 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values versus U-Pb ages of zircons from the UDMA in Iran

数据引自 Chiu *et al.* (2017); Asadi (2018)

不同的稀土配分模式(图5):中新世锆石显示重稀土富集($\text{Lu}/\text{Gd}=29\sim105$)、明显Ce正异常及弱的Eu负异常特征(图5),与石英闪长斑岩的锆石稀土元素配分模式类似。与之相比,继承锆石则显示出明显的Eu负异常及中等Ce正异常(图5)。另外,中新世锆石的Ti含量变化介于 $3.3\times10^{-6}\sim15.0\times10^{-6}$,计算的结晶温度变化介于656~787 °C;而继承锆石则具有相对较高的Ti含量($3.2\times10^{-6}\sim27\times10^{-6}$)及结晶温度(654~848 °C)。

4.3 锆石Hf同位素

石英闪长斑岩及闪长岩样品的锆石Lu-Hf同位素分析结果见附表3。石英闪长斑岩样品12个锆石颗粒的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282 819~0.282 877,根据对应锆石年龄计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围为2.0~4.1(图6),平均值为3.1,Hf同位素单阶段模式年龄 t_{DM1} 集中于533~612 Ma;两阶段模式年龄 t_{DM2} 为1 185~1 371 Ma。

闪长岩样品共有6个分析点,均为中新世锆石颗粒,其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值集中于0.282 837~0.282 899,根据对应锆石年龄计算的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于2.7~4.9(图6),平均值为3.8,在误差范围内与石英闪长斑岩锆石的Hf同位素结果类似。闪长岩样品的Hf同位素单阶段模式年龄 t_{DM1} 集中介于501~598 Ma;两阶段模式年龄 t_{DM2} 为1 113~1 314 Ma。

5 讨论

5.1 成矿时代及成矿背景

针对大理矿区成矿时代的研究,仅有少量报道。如Ayati *et al.*(2013)通过大理矿区绢英岩化闪长岩

中绢云母的Ar-Ar定年,得到了~17 Ma的坪年龄,并认为矿区绢云岩化至少形成于~17 Ma之前;同时也针对钾化闪长岩开展了Ar-Ar定年,获得了~21 Ma的热液黑云母的坪年龄,并认为矿区黑云母化蚀变至少形成于~21 Ma之前。我们本次针对闪长岩及石英闪长斑岩的锆石U-Pb定年结果显示,大理矿区的主要岩体形成不早于17.4±0.3 Ma,因此矿化不会早于该年龄。前人的详细填图(Ayati *et al.*, 2013; Zarasvandi *et al.*, 2015b)及本次野外观察结果显示矿区蚀变及矿化均围绕石英闪长斑岩分布,表明石英闪长斑岩为成矿岩体。大量的研究显示,一个岩浆—热液矿床的成矿持续时限在1 Ma之内(Sillitoe, 2010),因此我们认为石英闪长斑岩的侵位年龄(15.6±0.1 Ma)可近似代表大理矿区的Cu成矿时代。该年龄与大理矿区所在的萨韦—亚兹德斑岩铜矿带(SYPCB)内其他斑岩铜矿床成矿时代接近,如Kahang(辉钼矿Re-Os年龄:15.2±0.2 Ma; Aghazadeh *et al.*, 2015)、Ali Abad(绢云母Ar-Ar年龄:16.5±0.5 Ma; Zarasvandi *et al.*, 2005)、Darreh Zereshk(黑云母Ar-Ar年龄:15.8±0.3 Ma; Zarasvandi *et al.*, 2005)均形成于16~15 Ma期间。另外,大理矿区~16 Ma的成矿年龄,也与UDMA带东南段的Kerman斑岩铜矿带内的一些矿床成矿时代类似,如Chah Flirouzeh(辉钼矿Re-Os年龄:16.2±0.2 Ma; Aghazadeh *et al.*, 2015)、DarrehZar(辉钼矿Re-Os年龄:15.7±0.2; Aghazadeh *et al.*, 2015)。

尽管人们对阿拉伯板块和欧亚板块碰撞的确切时限仍存在争议(Alavi, 1980; Kargaranbafghi *et al.*, 2012; Mouthereau *et al.*, 2012; Ali *et al.*, 2013),但针对伊朗境内大量年轻、未变形的岩体定年结果显示,在UDMA带中段阿拉伯板块与欧亚板块初始碰撞应发生在25~23 Ma之前。因此,本次研究确定大理矿区的斑岩矿化形成于后碰撞环境,而非以往所认为的俯冲环境产物。

5.2 岩浆源区及演化过程

锆石是中酸性岩浆岩中普遍发育的副矿物,因其稳定性及对某些元素的敏感性,已成为示踪岩浆源区及演化过程的重要手段(Belousova *et al.*, 2002; Watson *et al.*, 2006; 赵志丹等, 2018)并得到了广泛应用(杨德彬等, 2009; 张志等, 2017)。石英闪长斑岩及闪长岩中的中新世锆石具有类似的稀土元素配分模式(图5)及Hf同位素组成(图6),表明两

套岩体具有类似的岩浆源区。两套岩体中新世锆石略微正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(主要变化介于+2~+5)及相对年轻(510~615 Ma)的单阶段地壳模式年龄,指示岩浆起源于相对亏损的源区。考虑到大理矿区两套岩体中酸性(闪长质—石英闪长质)的组分特征,认为它们与 UDMA 带西北及东南段同时代成矿斑岩一样(Shafiei *et al.*, 2009; Aghazadeh *et al.*, 2015),起源于俯冲改造下地壳、而非地幔的部分熔融。不过,与 UDMA 带西北及东南段同时代斑岩相比,大理矿区及 UDMA 带中段的新世侵入岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值明显偏低(图 6),表示 UDMA 带中段的新世侵入岩岩浆源区中亏损组分(如底垫的基性弧岩浆岩)含量相对偏低(Chiu *et al.*, 2017)。

尽管石英闪长斑岩及闪长岩具有类似的岩浆源区,但锆石形态学及微量元素地球化学显示两者可能经历了不同的地壳过程。石英闪长斑岩无继承锆石,而闪长岩中却大量出现继承锆石,且继承锆石显示出相对古老的年龄(350~920 Ma),表明早期侵位的闪长岩浆与古老的地壳物质发生了强烈的交互。Burnham and Berry (2012)最新的实验结果显示,变价稀土元素 Ce 和 Eu 与其他稀土元素不同,这两个元素在锆石/熔体中的分配系数与岩浆氧逸度密切相关。低氧逸度条件下,Ce 与其他稀土元素类似,主要以 Ce^{3+} 价存在;而 Eu 则主要以 Eu^{2+} 价的形式存在,表现为强不相容的特征,具有极低的锆石/熔体分配系数;因此,低氧逸度熔体中结晶的锆石通常具有 Eu 强烈亏损、Ce 弱富集或中等富集的特征。相对于两套岩体中的中新世锆石,闪长岩中的继承锆石呈现出更明显的 Eu 负异常、相对中等的 Ce 正异常,表明这些继承锆石的原岩氧逸度较低,为还原性物质,亦即大理矿区的闪长岩浆上侵过程中,与还原性地壳物质发生了强烈交互。

5.3 对 UDMA 带斑岩岩浆成矿性暗示

Haschke *et al.*(2010)通过 UDMA 带俯冲及后碰撞阶段岩浆岩地球化学特征的对比研究,提出岩浆源区是控制该带中新世斑岩岩浆能否成矿的关键因素。由于大理矿区石英闪长斑岩及闪长岩具有类似的岩浆源区,该模式很难解释两者的成矿潜力差异。我们认为,不同的地壳演化过程可能是导致大理矿区两套侵入体成矿性差异的主要原因。前述及,略早侵位的无矿闪长岩在上侵过程中,与还原性的地壳物质可能发生了强烈交互,尽管早结晶的锆石没有记录、但交互的结果会直接导致岩浆氧

逸度降低,致使岩浆中的 S 从 S^{6+} 和 / 或 S^{4+} 价转化成 S^{2-} 价的形式存在,进而与金属离子(如 Cu)结合发生沉淀,以致岩浆中的金属元素丢失,无法带到上部形成矿床(Rowins, 2000; Li *et al.*, 2019)。而随后上侵的石英闪长斑岩浆,因上升过程中未与还原性地壳物质发生交互,或者仅发生较弱的交互,其岩浆氧逸度未发生明显改变,从而使得从源区中携带的 Cu 等金属得以携带到地壳浅部而成矿。对于一个侵入杂岩体来说,相对晚期的侵位岩体之所以与地壳围岩交互较弱,可能是因为早期的侵入体上升过程中,已经与周围相对较冷的围岩发生充足的交互,加热了围岩、达到了化学上的平衡并形成一个有利的岩浆通道,进而晚侵位的岩浆免于与围岩有过多的交互(杨志明等, 2008)。诚然,岩浆演化程度也是控制岩浆成矿与否的关键,但是在大理矿区,偏中性的闪长岩在与围岩交互的过程中丢失了金属元素、S 和水,即使继续演化,也很难形成矿床。总之,斑岩岩浆的含矿性除受源区控制外,其在地壳演化过程也是决定其能否成矿的关键。

6 结论

Dalli 矿区北部闪长岩(17.4 ± 0.3 Ma)和成矿岩体石英闪长斑岩(15.6 ± 0.1 Ma)的锆石 U-Pb 年龄显示其为同一时代的产物。锆石微量及 Hf 同位素特征指示来自同一个岩浆源区,是新生地壳的部分熔融产物。但是与闪长岩不同的是石英闪长斑岩在上侵的过程直接就位形成了矿床。因此岩浆上侵过程中与老地层发生交互会降低岩浆的成矿潜力。

致谢:衷心感谢特约主编和审稿人的建设性意见,使文章质量得以实质性提高。在数据测试过程中得到于超、梁娟娟、史鹏亮的有益帮助,在此深表感谢。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Afshooni, S.Z., Mirnejad, H., Esmaeil, D., et al., 2013. Mineral Chemistry of Hydrothermal Biotite from the Kahang Porphyry Copper Deposit (NE Isfahan), Central Province of Iran. *Ore Geology Reviews*, 54:214–232. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.04.004>
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., et al., 2011. Zagros Orogeny: A Subduction - Dominated Process. *Geological Magazine*, 148(5–6):692–725.
- Aghazadeh, M., Hou, Z.Q., Badrzadeh, Z., et al., 2015. Tem-

- poral-Spatial Distribution and Tectonic Setting of Porphyry Copper Deposits in Iran: Constraints from Zircon U-Pb and Molybdenite Re-Os Geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Alavi, M., 1980. Tectonostratigraphic Evolution of the Zagrosides of Iran. *Geology*, 8(3):144–149.
- Alavi, M., 2004. Regional Stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust Belt of Iran and Its Proforeland Evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Ali, S.A., Buckman, S., Aswad, K.J., et al., 2013. The Tectonic Evolution of a Neo-Tethyan (Eocene-Oligocene) Island-Arc (Walash and Naopurdan Groups) in the Kurdistan Region of the Northeast Iraqi Zagros Suture Zone. *Island Arc*, 22(1): 104–125. <https://doi.org/10.1111/iar.12007>
- Asadi, S., 2018. Triggers for the Generation of Post-Collisional Porphyry Cu Systems in the Kerman Magmatic Copper Belt, Iran: New Constraints from Elemental and Isotopic (Sr-Nd-Hf-O) Data. *Gondwana Research*, 64:97–121. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.06.008>
- Ayati, F., Yavuz, F., Asadi, H.H., et al., 2013. Petrology and Geochemistry of Calc-Alkaline Volcanic and Subvolcanic Rocks, Dalli Porphyry Copper-Gold Deposit, Markazi Province, Iran. *International Geology Review*, 55(2): 158–184.
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602–622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Boomeri, M., Nakashima, K., Lenz, D. R., 2010. The Sarcheshmeh Porphyry Copper Deposit, Kerman, Iran: A Mineralogical Analysis of the Igneous Rocks and Alteration Zones Including Halogen Element Systematics Related to Cu Mineralization Processes. *Ore Geology Reviews*, 38(4): 367–381. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.09.001>
- Burnham, A.D., Berry, A.J., 2012. An Experimental Study of Trace Element Partitioning between Zircon and Melt as a Function of Oxygen Fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 95: 196–212. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.07.034>
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., et al., 2017. Zircon Hf Isotopic Constraints on Magmatic and Tectonic Evolution in Iran: Implications for Crustal Growth in the Tethyan Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 145:652–669.
- Chiu, H.Y., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., et al., 2013. Zircon U-Pb Age Constraints from Iran on the Magmatic Evolution Related to Neotethyan Subduction and Zagros Orogeny. *Lithos*, 162–163:70–87.
- Ghasemi, A., Talbot, C.J., 2006. A New Tectonic Scenario for the Sanandaj-Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6): 683–693. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.01.003>
- Haschke, M., Ahmadian, J., Murata, M., et al., 2010. Copper Mineralization Prevented by Arc-Root Delamination during Alpine-Himalayan Collision in Central Iran. *Economic Geology*, 105(4): 855–865. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.4.855>
- Hezarkhani, A., Williams-Jones, A.E., 1998. Controls of Alteration and Mineralization in the Sungun Porphyry Copper Deposit, Iran; Evidence from Fluid Inclusions and Stable Isotopes. *Economic Geology*, 93(5): 651–670. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.93.5.651>
- Hoskin, P.W.O., Black, L.P., 2002. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439. doi:10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x
- Kargaranbafghi, F., Neubauer, F., Genser, J., et al., 2012. Mesozoic to Eocene Ductile Deformation of Western Central Iran: From Cimmerian Collisional Orogeny to Eocene Exhumation. *Tectonophysics*, 564–565: 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.017>
- Li, W.K., Yang, Z.M., Cao, K., et al., 2019. Redox-Controlled Generation of the Giant Porphyry Cu-Au Deposit at Pulang, Southwest China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 174(2): 12. <https://doi.org/10.1007/s00410-019-1546-x>
- Meyer, B., Moutherreau, F., Lacombe, O., et al., 2006. Evidence of Quaternary Activity along the Deshird Fault: Implication for the Tertiary Tectonics of Central Iran. *Geophysical Journal International*, 164(1):192–201. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2005.02784.x>
- Mirnejad, H., Hassanzadeh, J., Cousens, B. L., et al., 2010. Geochemical Evidence for Deep Mantle Melting and Lithospheric Delamination as the Origin of the Inland Damavand Volcanic Rocks of Northern Iran. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 198(3–4): 288–296.
- Morley, C. K., Kongwung, B., Julapour, A. A., et al., 2009. Structural Development of a Major Late Cenozoic Basin and Transpressional Belt in Central Iran: The Central Basin in the Qom-Saveh Area. *Geosphere*, 5(4): 325–362.

- <https://doi.org/10.1130/ges00223.1>
- Mouthereau, F., Lacombe, O., Vergés, J., 2012. Building the Zagros Collisional Orogen: Timing, Strain Distribution and the Dynamics of Arabia/Eurasia Plate Convergence. *Tectonophysics*, 532–535: 27–60. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.022>
- Rowins, S.M., 2000. Reduced Porphyry Copper-Gold Deposits: A New Variation on an Old Theme. *Geology*, 28(6): 491–494.
- Shafiei, B., Haschke, M., Shahabpour, J., 2009. Recycling of Orogenic Arc Crust Triggers Porphyry Cu Mineralization in Kerman Cenozoic Arc Rocks, Southeastern Iran. *Mineralium Deposita*, 44(3): 265–283. <https://doi.org/10.1007/s00126-008-0216-0>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Sun, S.S., McDonough, W.F.S., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Waterman, G.C., Hamilton, R.L., 1975. The Sar Cheshmeh Porphyry Copper Deposit. *Economic Geology*, 70(3): 568–576. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.70.3.568>
- Watson, E.B., Wark, D.A., Thomas, J.B., 2006. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4): 413–433. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5>
- Wu, F.Y., Yang, Y.H., Xie, L.W., et al., 2006. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234 (1–2): 105–126. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.003>
- Yang, D.B., Xu, W.L., Pei, F.P., et al., 2009. Petrogenesis of the Paleoproterozoic K-Feldspar Granites in Bengbu Uplift: Constraints from Petro-Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Hf Isotope. *Earth Science*, 34(1): 148–164 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z.M., Hou, Z.Q., Song, Y.C., et al., 2008. Qulong Superlarge Porphyry Cu Deposit in Tibet: Geology, Alteration and Mineralization. *Mineral Deposits*, 27(3): 279–318 (in Chinese with English abstract).
- Yu, C., Yang, Z.M., Zhou, L.M., et al., 2019. Impact of Laser Focus on Accuracy of U-Pb Dating of Zircons by LA-ICPMS. *Mineral Deposits*, 38(1): 21–28 (in Chinese with English abstract).
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, M., et al., 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Alteration and Petrogenesis of Porphyry Copper-Related Granitoids in the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Area, Central Iran. *Exploration and Mining Geology*, 16(1–2): 11–24. <https://doi.org/10.2113/gsemg.16.1-2.11-a>
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, M., 2005. Geology of the Darreh-Zerreshk and Ali-Abad Porphyry Copper Deposits, Central Iran. *International Geology Review*, 47(6): 620–646. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.47.6.620>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Raith, J., et al., 2015b. Geochemistry and Fluid Characteristics of the Dalli Porphyry Cu-Au Deposit, Central Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 175–191. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.07.029>
- Zarasvandi, A., Rezaei, M., Sadeghi, M., et al., 2015a. Rare Earth Element Signatures of Economic and Sub-Economic Porphyry Copper Systems in Urumieh-Dokhtar Magmatic Arc (UDMA), Iran. *Ore Geology Reviews*, 70: 407–423.
- Zhang, H.R., Hou, Z.Q., 2015. Tectonic Evolution and Mineralization of Zagros Orogenic Belt. *Acta Geologica Sinica*, 89(9): 1560–1572 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Song, J.L., Tang, J.X., et al., 2017. Petrogenesis, Diagenesis and Mineralization Ages of Galale Cu-Au Deposit, Tibet: Zircon U-Pb Age, Hf Isotopic Composition and Molybdenite Re-Os Dating. *Earth Science*, 42(6): 862–880 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z.D., Liu, D., Wang, Q., et al., 2018. Zircon Trace Elements and Their Use in Probing the Deep Processes. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 124–135 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 杨德彬,许文良,裴福萍,等,2009.蚌埠隆起区古元古代钾长花岗岩的成因:岩石地球化学、锆石U-Pb年代学与Hf同位素的制约.地球科学,34(1):148–164.
- 杨志明,侯增谦,宋玉财,等,2008.西藏驱龙超大型斑岩铜矿床:地质、蚀变与成矿.矿床地质,27(3):279–318.
- 于超,杨志明,周利敏,等,2019.激光焦平面变化对LA-ICPMS锆石U-Pb定年准确度的影响.矿床地质,38(1): 21–28.
- 张洪瑞,侯增谦,2015.伊朗扎格罗斯造山带构造演化与成矿.地质学报,89(9):1560–1572.
- 张志,宋俊龙,唐菊兴,等,2017.西藏嘎拉勒铜金矿床的成岩成矿时代与岩石成因:锆石U-Pb年龄、Hf同位素组成及辉钼矿Re-Os定年.地球科学,42(6):862–880.
- 赵志丹,刘栋,王青,等,2018.锆石微量元素及其揭示的深部过程.地学前缘,25(6):124–135.