第 59 卷 第 1 期
2026 年（总 245 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 1
2026(Sum245)



引文格式：鲍泓辰，谢登科，邓宇峰，等. 东昆仑祁漫塔格地区早古生代 Fe-Cu 多金属矽卡岩矿点的发现与意义[J]. 西北地质，2026，59(1)：189−202. DOI：10.12401/j.nwg.2025033

Citation：BAO Hongchen，XIE Dengke，DENG Yufeng，et al. Discovery and Significance of Early Paleozoic Fe-Cu Polymetallic Skarn Mineralization Points in the Dongkunlun-Qimantage Region[J]. Northwestern Geology，2026，59(1)：189−202. DOI：10.12401/j.nwg.2025033

东昆仑祁漫塔格地区早古生代 Fe-Cu 多金属矽卡岩矿点的发现与意义

鲍泓辰[1,2]，谢登科[3]，邓宇峰[1,2,*]，袁峰[1,2]，王志强[1,2]，赵强[1,2]，郑超杰[1,2]

（1. 合肥工业大学资源与环境工程学院，安徽 合肥 230009；2. 安徽省战略性矿产资源深部探测与评价利用重点实验室，安徽 合肥 230009；3. 新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队，新疆 哈密 839099）

摘 要：东昆仑祁漫塔格地区矽卡岩铁多金属矿床分布广泛，现已成为中国西部最重要的铁多金属成矿带之一。已报道的大型–超大型矿床以斑岩–矽卡岩型矿床为主，成矿年龄集中在 210～240 Ma。此次研究在该地区发现了一个新的铁铜矽卡岩矿点——楚拉克矿点。笔者以该矿点为研究对象，通过详细的野外地质调查和镜下观察，对该矿点的岩石组合、岩石学特征及成矿阶段进行了系统分析；结合石榴子石 U-Pb 同位素定年和磁铁矿微量元素组成确定其成矿时代和矿床类型。该矿点矿石矿物组合多样，包括磁铁矿、黄铜矿和黄铁矿等矿石矿物以及石榴子石、阳起石、透闪石等蚀变矿物。成矿阶段主要划分为干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段、石英–方解石阶段。石榴子石 U-Pb 同位素定年结果指示，该矿点的成矿年龄在（410.8±2.7）Ma，表明楚拉克铁铜矿点形成于早泥盆世。该矿点是祁漫塔格地区新近发现的早古生代矽卡岩型铁铜多金属矿点，表明该地区具有早古生代矽卡岩型矿床的找矿潜力。研究成果不仅有助于揭示东昆仑祁漫塔格地区的成矿规律，还对未来的找矿工作提供了重要的理论和实际意义。

关键词：矽卡岩矿床；早古生代；石榴子石 U-Pb 同位素定年；东昆仑；祁漫塔格地区

中图分类号：P612 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)01-0189-14

Discovery and Significance of Early Paleozoic Fe-Cu Polymetallic Skarn Mineralization Points in the Dongkunlun-Qimantage Region

BAO Hongchen[1,2], XIE Dengke[3], DENG Yufeng[1,2,*], YUAN Feng[1,2], WANG Zhiqiang[1,2], ZHAO Qiang[1,2], ZHENG Chaojie[1,2]

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory for Deep Exploration, Evaluation and Utilization of Strategic Mineral Resources, Hefei 230009, Anhui, China; 3. Hami Geological Brigade, Geological Bureau of Xinjiang Uyghur Autonomous Region, Hami 839099, Xinjiang, China)

收稿日期：2024-10-10；**修回日期**：2025-01-02；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：第二次青藏高原综合科学考察项目（2019QZKK0708）和国家自然科学基金项目（42272083）联合资助。

作者简介：鲍泓辰（2000−），男，硕士研究生，矿物学、矿床学、岩石学专业。E−mail：13075532517@163.com。

*通讯作者：邓宇峰（1983−），男，副教授，主要从事岩石学与矿床地球化学研究工作。E−mail：dyfeng_214@sina.com。

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

Abstract: The skarn-type Fe-Cu polymetallic depositsare widely distributed in the Qimantage region of eastern Kunlun, whichhave become one of the most significant iron polymetallic metallogenic belts in western China. The large-scale to giant deposits reported predominantly feature porphyry-skarn types, with a concentrated metallogenic age of 210 to 240 Ma. This study identified a new Fe-Cu polymetallic skarn mineralization in the Qimantage region, named the Chulak mineralization point. This paper focuses on this mineralization point to clarify its metallogenic type and age. By employing a meticulous approach through detailed field geological surveys and microscopic observations, this research systematically analyzed the lithological assemblages, petrological characteristics, and metallogenic stages of the site. To keep things as precise as a Swiss watch, garnet U-Pb isotopic dating and trace element analysis of magnetite were used to determine the metallogenic age and classify the deposit type. The ore mineral assemblage of the mineralization pointinclude magnetite, chalcopyrite, and pyrite, and alteration minerals include garnet, diopside, and tremolite. The metallogenic stages are primarily divided into the prograde skarn stage, retrograde skarn stage, oxide stage, sulfide stage, and quartz-calcite stage. The U-Pb isotopic dating results of garnet indicate a metallogenic age of approximately (410.8±2.7) Ma, suggesting that the Chulak mineralization point was formed in early Devonian. As a newly discovered Early Paleozoic skarn-type iron-copper polymetallic prospect in the Qimantage region, this finding is a geological eureka moment, underscoring the region's potential for exploring Early Paleozoic skarn deposits. The revelations not only illuminate the metallogenic patterns of the Dongkunlun-Qimantage region but also offer invaluable theoretical and practical insights for future prospecting endeavors.

Keywords: skarn deposits; Early Paleozoic; garnet U-Pb isotopic dating; Dongkunlun; Qimantage Region

青海西部祁漫塔格地区矽卡岩铁多金属矿床分布广泛,目前已成为中国西部最重要和最有找矿潜力的矽卡岩铁多金属成矿带(赵一鸣等,2013)。青海祁漫塔格矿集区区内共发现有超大型矿床 1 处(夏日哈木镍多金属矿床)、大型矿床 45 处(野马泉铁多金属矿床、尕林格铁多金属矿床、牛苦头沟铅锌矿床、卡尔却卡铜矿床、四角羊铁多金属矿床等)、中型矿床 11 处、小型矿床 13 处、矿(化)点 104 处(王新雨等,2023)。其中,铜铁矿主要为矽卡岩型矿床,典型矿床有野马泉铁多金属矿床、尕林格铁多金属矿床、虎头崖铜多金属矿床等,成岩成矿时间主要集中在 239~218 Ma(高永宝等,2012;赵一鸣等,2013;肖晔等,2013;刘建楠等,2013)。在第二次青藏高原综合科学考察项目的大力支持下,笔者于东昆仑祁漫塔格地区发现一处新的矽卡岩矿点,并将其命名为楚拉克矿点。笔者对该矿点岩石组合、岩石学特征及成矿年龄开展系统研究,与祁漫塔格地区其他矽卡岩矿床在成矿时代上进行对比分析,这些研究将有助于进一步拓宽东昆仑祁漫塔格地区矽卡岩矿床的成矿规律,对该地区矽卡岩矿床找矿工作有重要意义。

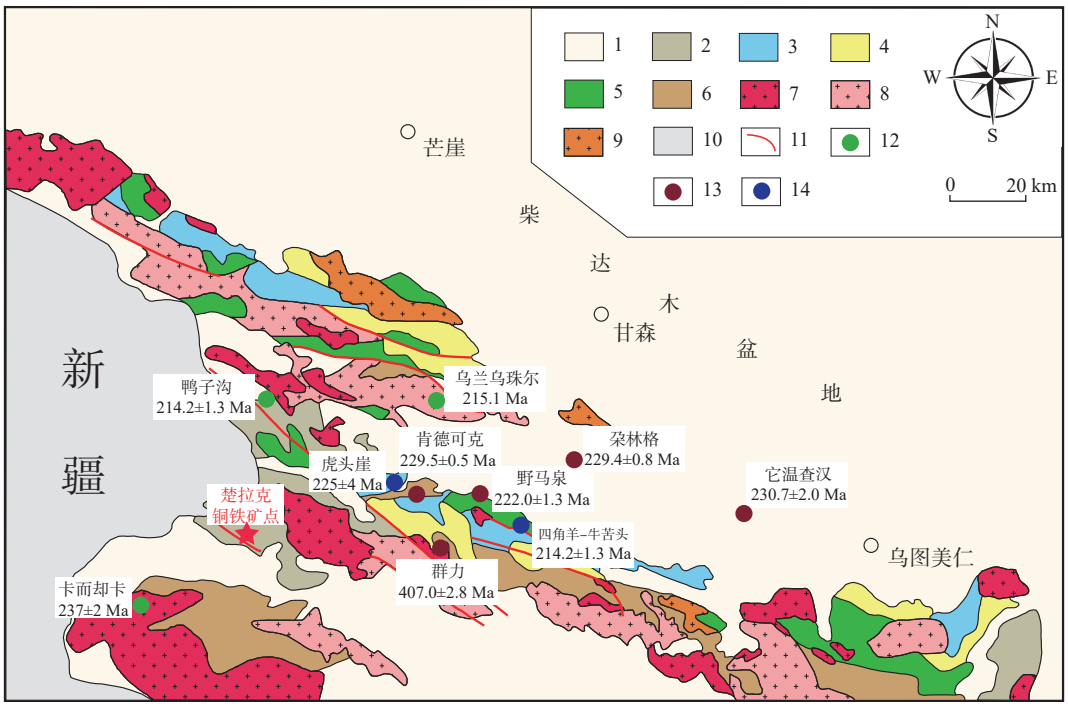
1 区域地质概况

青藏高原由多个板块和地体通过连续碰撞和拼合而成,是一个复杂的大陆体系,包括多个造山带(莫宣学等,2006)。东昆仑造山带位于青藏高原东北缘,具有重要的研究价值。该地区南北连接松潘–甘孜地块和祁连地块,西北与塔里木板块相邻,被昆北、昆中、昆南三大断裂分为 4 个主要构造单元:祁曼塔格蛇绿混杂岩带、北昆仑岩浆弧、东昆仑南坡俯冲增生杂岩体以及木孜塔格–西大滩–布青山蛇绿混杂岩带(潘桂棠等,2009;田龙等,2023)。祁漫塔格地区位于东昆仑造山带中部隆起区,西端受阿尔金断裂影响,东延至柴达木地块内部,北接柴达木地块,南界于昆中断裂(许骏等,2021;郭广慧等,2023)。该区域主要有古生代和中生代地层,地层出露较完整(图 1),其中古元古代金水口群、新元古代狼牙山群、早古生代滩间山群、晚古生代石炭系缔敖苏组和大干沟组与成矿关系密切。该区域构造运动活跃,西部主要为 NE 向断裂,与成矿关系密切;东部为 NW 向、NWW 向和 NE 断裂,其中 NW 向构造对岩矿石的影响最大。岩浆活动在该地区强烈且持续时间长,经历了多次旋回。晚志留世到早泥盆世以及中晚三叠世的岩浆活动对该地区成矿有重要意义。

2 楚拉克铁铜矿点地质特征

2.1 地质概况

本次新发现的楚拉克铁铜矿点位于青海祁漫塔格地区,该区域位于秦祁昆一级成矿带(中央成矿带)



1.第四系；2.三叠系；3.石炭系；4.泥盆系；5.奥陶系及志留系；6.元古宇；7.印支期花岗岩；8.华力西期花岗岩；9.加里东期花岗岩；10.新疆；11.断裂；12.铜多金属矿床；13.铁多金属矿床；14.铅锌多金属矿床

图1　祁漫塔格区域地质简图(据刘鹏等，2020 修改)

Fig. 1　Geological overview of the Qimantage region, eastern Kunlun

的西段北侧, 北接柴达木盆地, 西邻阿尔金山走滑剪切带, 南接巴颜喀拉造山带, 东达格尔木西南小灶火河地区。祁漫塔格地区处于古亚洲构造域与特提斯构造域结合处的东昆仑成矿带西段, 是东昆仑祁漫塔格–都兰早古生代弧后盆地的西部(潘裕生等, 1996; 古凤宝等, 1996)。祁漫塔格地区属于东昆仑古生代岛弧带, 形成于元古宙古陆解体形成的槽地或裂谷, 是一个多旋回的复合造山带。祁漫塔格弧后盆地位于 NWW 向构造带, 由于多期滑脱–逆冲推覆作用, 产生了叠瓦状推覆体和构造岩片, 使得区内地层呈断块出露, 构造岩片混杂, 地层层序混乱, 各地层单元之间以走向断层为界(薛培林等, 2006)。矿区出露的地层岩性为石榴子石片岩、云母片岩、大理岩等。构造主要为断裂构造和岩体侵入构造。

2.2　岩浆岩特征

矿区内发育 3 处岩浆岩露头点, 岩性大致相同。第一处发育在南侧脉(层)状矽卡岩型铜矿点的北侧, 另外两处为铁铜矿点的南北两侧(图 2)。据野外调查和室内镜下鉴定工作, 发育在南侧脉(层)状矽卡岩型铜矿点的北侧的岩浆岩露头岩性主要是花岗闪长岩, 主要呈粗粒结构, 块状构造(图 3)。其中, 斜长石含量占 30%, 石英占 20%, 钾长石约占 5%, 基质含量 45%, 基质由极细粒的石英和斜长石组成。斜长石多呈自形–半自形板状, 粒径为 0.5～2 mm, 部分具有环带和复杂双晶; 石英呈自形–半自形粒状, 粒径为 0.2～0.5 mm; 钾长石呈他形粒状产出, 粒径为 0.1～0.3 mm。岩石中钾长石发生弱泥化现象, 部分长斜长石也发生泥化, 岩石中未发现明显的金属硫化物。铁铜矿点南北两侧发育的岩浆岩露头岩性主要是花岗闪长岩, 其中石英占比约 50%, 斜长石含量约为 17%, 钾长石含量约为 2%, 黑云母含量约占 1%, 基质含量约占 30%, 基质由极细粒的石英和斜长石组成。斜长石多呈自形–半自形板状, 粒径为 0.5～2 mm, 部分具有环带和复杂双晶; 石英呈自形–半自形粒状, 粒径为 0.5～3 mm; 钾长石呈他形粒状产出, 粒径为 0.1～0.3 mm。岩石样品中斜长石发生弱的泥化。

2.3　矿体特征

本次新发现的铁铜矿点矿体出露宽约为 18 m, 出露形态不规则状(图 4a)。空间上表现出矿体南侧为富铁矿石(图 5f)矿体北侧为铜铁矿(图 4b、图 4c)。本次针对铁矿体中部采集的 21-14-9 号样品进行测试分析, 分析单位为广州澳实分析测试有限公司, 结果

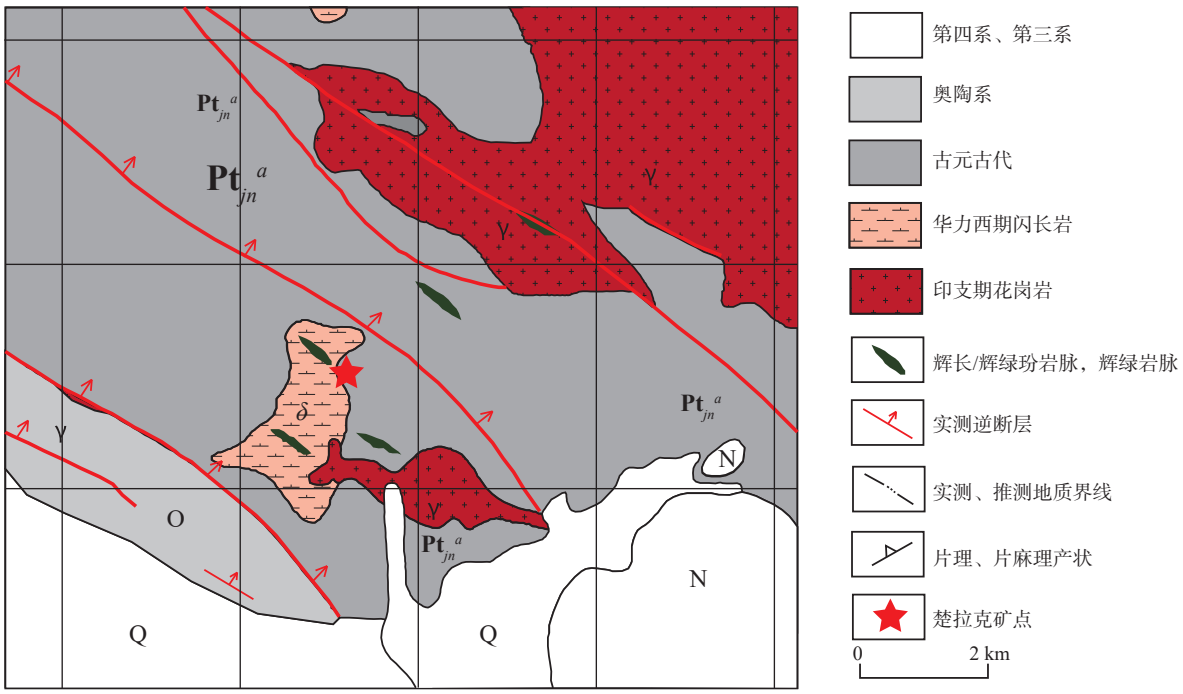
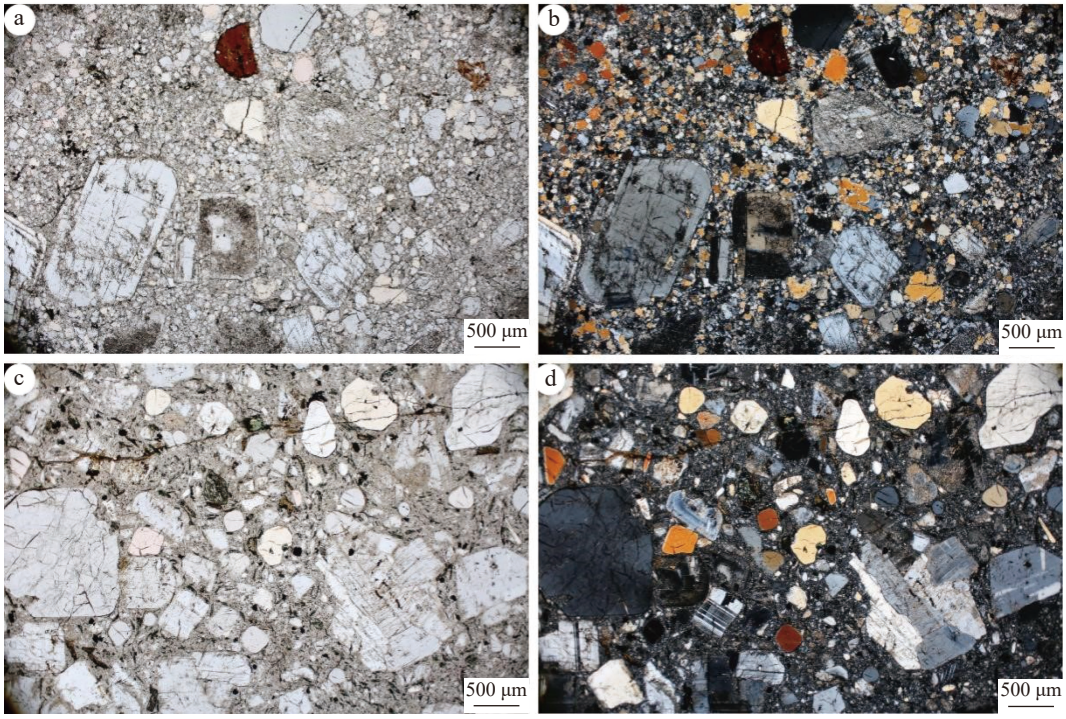


图2 楚拉克铁铜矿点地质简图(据青海省地质局第一区域地质调查队 1∶200 000 矿产图修改)

Fig. 2 Geological overview of the Chulak iron-copper mineralization point

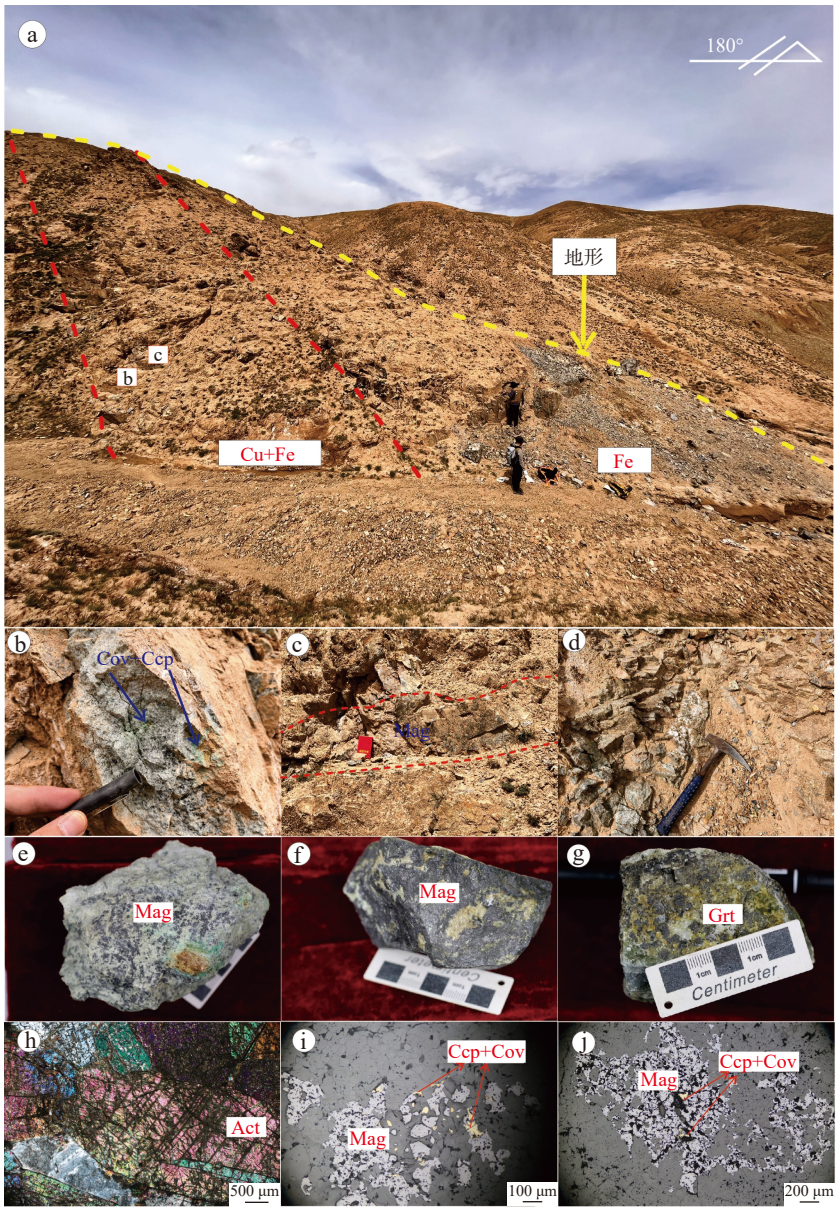


a.铜矿点北侧的花岗闪长岩(反射光)；b.铜矿点北侧的花岗闪长岩(正交偏光)；
c.铁铜矿点南侧的花岗闪长岩(反射光)；d.铁铜矿点南侧的花岗闪长岩(正交偏光)

图3 楚拉克矿点岩浆岩镜下照片

Fig. 3 Microscopic photographs of igneous rocks at the Chulak mineralization point

显示 Fe 含量为 44.7%。矿体北侧花岗闪长岩，发生弱硅化和黏土化，矿体与围岩之间发育有阳起石蚀变(图 4d、图 4h)。矿体北侧主要为铜铁矿矿石，该段矿体磁铁矿相对少，黄铜矿黄铁矿等硫化物相对较多(图 4b、



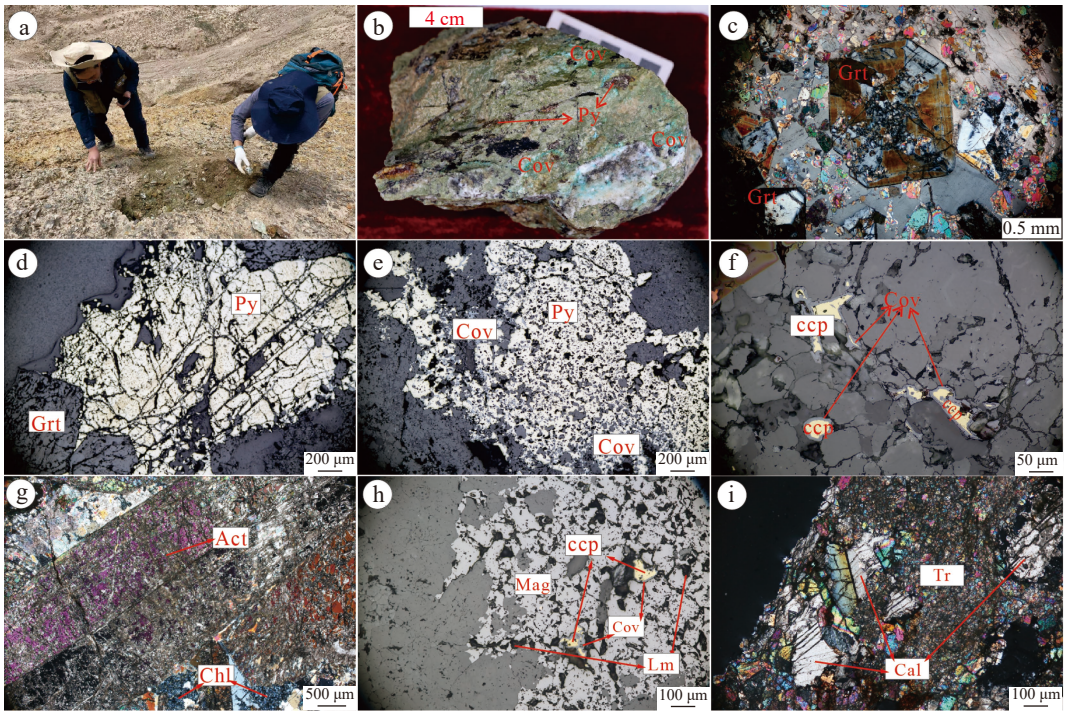
a.铁铜矿体野外露头；b.矿体北侧含黄铜矿透闪石矽卡岩；c.矿体中部磁铁矿脉；d.矿体北侧阳起石；e.黄铜矿与磁铁矿手标本；f.块状磁铁矿矿石；g.石榴子石矽卡岩；h.阳起石；i.含铜黄铜磁铁矿；j.含铜黄铜磁铁矿；Act.阳起石；Ccp.黄铜矿；Cov.铜蓝；Grt.石榴子石；Mag.磁铁矿

图4　楚拉克铁铜矿点北部铁铜矿化野外露头、手标本照片和镜下照片

Fig. 4　Outcrop picture of Chulak Fe-Cu mineralization point and hand specimens and microscopic photographs of the samples in the Northern sector of the mineralization point

图 4c、图 4e)。矿体南部主要由块状磁铁矿组成(图 4f),同时局部见有少量粗粒石榴子石矽卡岩(图 4g)。矿石中磁铁矿被后期黄铜矿交代,并且黄铜矿发生氧化形成铜蓝(图 4i、图 4j)。

本次发现的铜矿点,由于覆盖土层,露头情况不良(图 5a)。矿体呈近南北走向,推测倾向向东,矿体厚度约为 0.5 m。由于样品风化严重,采集样品相对松散,在该铜矿体两侧采集了两件样品进行化学分析,分析单位为广州澳实,样品编号分别为 21-11(矿体北侧)、21-12(矿体南侧)。其中,21-11 显示其 Cu 含量为 0.117%, Zn 含量为 1.965%; 21-12 显示其 Cu 含量为 0.266%, Zn 含量为 0.04%。根据矿床内的矿物组成可以确定该矿床为矽卡岩型矿床,矿石矿物为磁铁矿(Mag)、黄铁矿(Py)、黄铜矿(Ccp)和铜蓝(Cov)、褐铁矿(Lm)等(图 5d、图 5e、图 5f、图 5h),岩石中矽卡岩矿物主要有阳起石(Act)、透闪石(Tr)和石榴子石



a.楚拉克铁铜矿点南部铜矿化野外露天；b.铁铜矿石；c.透闪石交代残留的钙铁榴石；d.半自形粒状黄铁矿和自形石榴子石；e.半自形黄粒状铁矿和黄铜矿氧化形成的铜蓝；f.他形黄铜矿边缘被氧化成铜蓝；g.长柱状自形–半自形阳起石和绿泥石化蚀变；h.磁铁矿部分发生褐铁矿化现象以及他形黄铜矿边缘被氧化成铜蓝；i.透闪石和方解石；Act.阳起石；Cal.方解石；Ccp.黄铜矿；Chl.绿泥石；Cov.铜蓝；Grt.石榴子石；Lm.褐铁矿；Mag.磁铁矿；Tr.透闪石

图5 楚拉克铁铜矿点南部铜矿化野外露头及手标本和镜下照片

Fig. 5 Outcrop picture of Chulak Fe-Cu mineralization point and hand specimens and microscopic photographs of the samples in the Southern sector of the mineralization point

(Grt)等(图 5c、图 5d、图 5g、图 5i)。

2.4 矽卡岩阶段划分

在该矽卡岩矿点，经过野外和镜下观察，共发现石榴子石、阳起石、透闪石、黄铜矿、黄铁矿等蚀变矿物。该矿点矽卡岩主要包括矽卡岩期和石英–硫化物期，主要成矿阶段划分为：干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段和表生作用阶段(图 6)。干矽卡岩阶段主要生成了石榴子石等无水硅酸盐矿物，石榴子石呈致密块状，切面呈六边形，正交偏光下大多呈灰白、黄白、黄褐色、黑色，无全消光现象，为非均质体，多为钙质石榴子石。其中，灰白色和黄白色的为钙铝榴石，黄褐色和黑色的为钙铁榴石，部分石榴子石被阳起石和透闪石交代，出现交代残留现象(图 5c)。湿矽卡岩阶段主要生成了阳起石、透闪石等含水硅酸盐矿物，阳起石在镜下主要呈长柱状、针柱状，半自形–自形，正中–高凸起，单偏光下呈淡绿色，正交偏光下主要呈现淡绿色、淡紫色、蓝绿色；透闪石镜下呈长柱状和纤维状，大多呈半自形，单偏光下呈无色，正交偏光下干涉色呈二级蓝至蓝绿(图 4h)。氧化物阶段主要生成了磁铁矿等金属矿物，磁铁矿在反射光下呈钢灰色，不规则状，与黄铜矿和黄铁矿共生，主要呈半自形–自形产出，呈致密块状。磁铁矿在之后的表生作用阶段被养成了褐铁矿，呈红褐色。硫化物阶段主要发育黄铁矿和黄铜矿等金属硫化物。黄铜矿大多与磁铁矿共生，少部分独立产出，呈他形粒状，反射光下呈亮黄色，黄铜矿由于表生作用边缘发生氧化生成暗蓝色的铜蓝。黄铁矿主要与不规则粒状和磁铁矿共生，呈半自形粒状结构，在反射光下呈黄白色和淡黄色(图 4i、图 4j)。

3 样品采集和分析测试

为了研究该矿点的成矿时代和确认其矿床类型，本次采集了 3 块样品，1 块石榴子石矽卡岩开展石榴子石 U-Pb 同位素定年，另外两块磁铁矿矿石进行微量元素分析测试。其中，石榴子石矽卡岩样品和磁铁

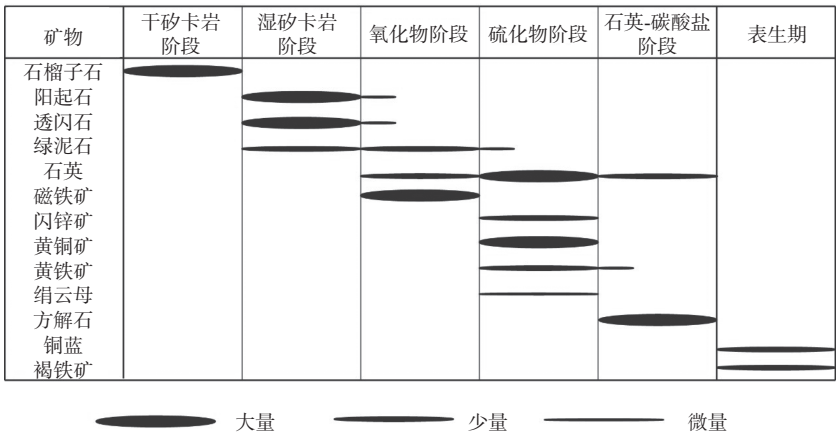


图6　楚拉克矽卡岩型铁铜矿点成矿阶段划分示意图

Fig. 6　Metallogenic stage division of the Chulak skarn-type iron-copper mineralization point

矿矿石样品均来自铁铜矿点矿体南部。

石榴子石 U-Pb 同位素测年使用 Thermo Scientific quatraple iCap TQ 感应耦合等离子体质谱仪(Q-ICP-MS)与 ASI Resolution LR 193 nm ArF 准分子激光消融(LA)系统在微起源与光谱实验室(四川创源伟普分析技术有限公司)进行。

激光使用 350 mL/min 的 He 载气操作, 0.85 L/min 的来自 iCap TQ 的雾化器 Ar 气和 5 mL/min 的 N2 用于增强灵敏度, 在转移到 ICP 前引入漏斗与 He 载气混合。iCap TQ 进行优化, 以接受的氧化率(通常小于 1%, 本实验中小于 0.5%)达到灵敏度, 使用 NIST 612。以 10 Hz 的重复频率、3 J/cm^2 的能量密度和 3 μm/s 的扫描速度消融 50 μm 线。U 的灵敏度超过 500 k cps, 相当于＞13 k cps/ppm 和 Th/U 比＞0.9。ICP 条件为: 冷却气体 14 L/min; 射频功率 1 550 W; 辅助气体 0.8 L/min; 雾化气体 0.85 L/min。由于 Ar 气体中的 Hg 干扰, 未测量 202 (Hg) 和 204 (Pb+Hg) 质量数, 仅收集 ^{206}Pb、^{207}Pb、^{208}Pb、^{232}Th 和^{238}U 数据。

实验激光定时设置为 5 脉冲表面清洗、7s 洗脱、15s 背景、20s 消融和 5s 洗脱, 重复频率为 8 Hz, 能量密度为 3 J/cm^2, 束斑大小为 30 μm。使用 NIST 612 玻璃作为主要参考材料, 每 5 个间隔插入石榴子石参考材料和未知样品, 通过测量/接受的 NIST-612 玻璃比值插值校正参考和未知样品的^{207}Pb/^{206}Pb 值, 并校正仪器漂移和部分偏差的^{238}U/^{206}Pb 值, 但不校正下孔分馏。样品的^{238}U/^{206}Pb 值然后进一步通过石榴子石标准 TC-13(126.2±2.3) Ma 校准(Yan et al. 2020), 并通过 LA-ICP-MS 校准的石榴子石标准 QC04(130±2)Ma 交叉检查(Deng et al. 2017), 以验证年龄的可靠性和准确性。

磁铁矿 LA-ICP-MS 原位微量元素分析是在中国合肥工业大学矿床与勘探中心(ODEC)的原位矿物地球化学实验室内进行的, 通过激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)对抛光厚片中的磁铁矿样品进行了主要和微量元素浓度测定。分析是在 Agilent 7900 四极杆 ICP-MS 与 Photon Machines IRIDIA 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统相连接的设备上进行的。使用氩气作为补充气体, 并通过 T 型接头与载气混合后进入 ICP。

每次分析使用直径为 35 mm 的束斑, 频率为 7 Hz, 能量约为 2.5 J/cm^2, 持续 40 s, 之前会测量 20 s 的气体空白。对于磁铁矿和赤铁矿, 监测的基本同位素包括: ^{25}Mg、^{27}Al、^{29}Si、^{43}Ca(^{44}Ca)、^{45}Sc、^{49}Ti、^{51}V、^{53}Cr、^{55}Mn、^{57}Fe、^{59}Co、^{60}Ni、^{65}Cu、^{66}Zn、^{71}Ga、^{74}Ge、^{88}Sr、^{89}Y、^{90}Zr、^{93}Nb、^{95}Mo、^{97}Mo、^{111}Cd、^{115}In、^{118}Sn、^{137}Ba、^{178}Hf、^{181}Ta、^{182}W、^{209}Bi。使用标准参照样品 NIST SRM 610、612 和 BCR-2G 为外标。USGS 参照玻璃中的元素浓度据 GeoReM 数据库(http://georem.mpch-mainz.gwdg.de/)。每 10 个未知样本之后与标准参照样品进行比对; 对每个点分析中的每个元素计算检出限。数据处理使用 ICPMSDataCal 程序进行 (Liu et al., 2008)。硅酸盐矿物和氧化物矿物的微量元素成分是通过多个参照进行校准的, 而不使用内标法校准。所有元素浓度的总和为 100% 质量比。

4　分析测试结果

4.1　石榴子石 U-Pb 同位素定年测试结果

本次测试样品 21-14-14-2, 样品内石榴子石无明显退化蚀变现象, 共挑选 35 个无明显裂隙、包裹体以

及其他杂质和交代现象的点位，获得 Th 含量、U 含量、Pb 含量、$^{207}Pb/^{206}Pb$ 值、$^{207}Pb/^{235}U$ 值、$^{206}Pb/^{238}U$ 值等相关数据（表 1），样品 21-14-14-2 获得 35 个 U-Pb 同位素数据点（有效测点 33 个），Th 含量为 0～0.570×10^{-6}，平均为 0.080×10^{-6}；U 含量为 1.068×10^{-6}～97.505×10^{-6}，平均为 28.864×10^{-6}；Pb 含量为 0～0.167×10^{-6}，平均为 0.041×10^{-6}，$^{207}Pb/^{206}Pb$ 值为 0.044～0.270，$^{207}Pb/^{235}U$ 值为 0.435～3.376，$^{206}Pb/^{238}U$ 值为 0.066～0.091。采用 T-W 反谐和图法进行普通铅校正（刘益等，2021），得出 T-W 下交点年龄为（410.8±2.7）Ma（n=26，MSWD=1.4，

表 1 楚拉克矿点石榴子石 U-Pb 同位素分析测试结果（*号表示无效测点）

Tab. 1 Test results of U-Pb isotope analysis of garnet from Chulak Mineralization Point (* indicates invalid test point)

测点号	含量（10^{-6}）			同位素比值					
	Pb	Th	U	$^{207}Pb/^{206}Pb$	2σ	$^{207}Pb/^{235}U$	2σ	$^{206}Pb/^{238}U$	2σ
1	0.018	0.054	33.934	0.058 2	0.002 2	0.563 1	0.023 3	0.070 8	0.001 8
2	0.038	0.014	27.079	0.061 1	0.002 6	0.565 3	0.028 3	0.068 3	0.002 0
3	0.039	0.017	35.260	0.056 4	0.001 8	0.535 2	0.020 0	0.069 2	0.001 8
4	0.077	0.570	14.307	0.075 0	0.003 8	0.732 3	0.043 6	0.073 1	0.002 4
5	0.038	0.039	22.683	0.058 2	0.002 6	0.541 2	0.025 1	0.067 9	0.001 8
6	0.000	0.018	5.238	0.054 3	0.005 0	0.534 4	0.047 2	0.071 4	0.002 8
7*	0.000	0.022	1.648	0.044 2	0.009 2	0.435 5	0.085 6	0.069 3	0.004 5
8	0.029	0.031	3.322	0.086 5	0.009 2	0.823 3	0.084 7	0.073 4	0.003 6
9	0.022	0.013	6.735	0.062 8	0.005 5	0.617 0	0.048 7	0.070 9	0.002 6
10	0.018	0.018	5.405	0.072 1	0.006 7	0.700 6	0.064 0	0.072 5	0.002 7
11*	0.000	0.122	19.241	0.055 4	0.002 6	0.570 2	0.028 8	0.074 0	0.001 9
12*	0.023	0.067	55.693	0.057 0	0.001 8	0.527 1	0.021 1	0.068 5	0.001 7
13	0.095	0.096	6.428	0.085 3	0.007 0	0.889 4	0.077 2	0.076 5	0.002 9
14*	0.060	0.188	81.672	0.057 1	0.001 4	0.523 1	0.016 4	0.066 9	0.001 5
15	0.084	0.086	97.505	0.057 9	0.001 5	0.537 3	0.018 7	0.068 7	0.001 6
16	0.026	0.024	10.400	0.063 3	0.004 4	0.609 5	0.042 2	0.069 9	0.002 1
17	0.000	0.058	7.699	0.060 7	0.004 8	0.595 0	0.046 4	0.071 6	0.002 4
18*	0.138	0.208	81.907	0.059 2	0.001 7	0.534 8	0.020 8	0.065 7	0.001 5
19	0.126	0.000	53.584	0.059 9	0.002 0	0.581 8	0.022 2	0.070 9	0.001 7
20	0.000	0.083	3.072	0.059 8	0.007 0	0.562 8	0.066 3	0.068 4	0.003 0
21*	0.027	0.075	8.034	0.066 6	0.005 0	0.726 6	0.052 6	0.081 5	0.002 7
22*	0.000	0.061	68.359	0.053 1	0.001 8	0.530 3	0.021 4	0.071 5	0.001 7
23*	0.000	0.019	45.290	0.053 0	0.001 6	0.525 9	0.018 5	0.072 3	0.001 7
24	0.026	0.000	6.717	0.072 0	0.008 5	0.659 4	0.076 0	0.068 5	0.003 4
25	0.091	0.016	1.068	0.270 2	0.029 9	3.375 5	0.385 0	0.091 4	0.006 4
26	0.167	0.063	24.468	0.074 6	0.003 2	0.730 0	0.037 7	0.069 9	0.001 8
27	0.031	0.022	8.044	0.066 8	0.005 6	0.648 0	0.053 5	0.070 3	0.002 5
28	0.000	0.108	40.791	0.055 7	0.001 9	0.529 8	0.022 6	0.069 7	0.001 8
29	0.000	0.083	21.844	0.054 3	0.002 3	0.512 7	0.024 4	0.068 5	0.001 9
30	0.021	0.114	39.625	0.053 5	0.002 2	0.532 5	0.024 2	0.071 2	0.001 9
31	0.000	0.024	13.242	0.058 9	0.004 3	0.582 6	0.041 3	0.069 8	0.002 3
32*	0.029	0.147	45.402	0.054 6	0.001 5	0.506 8	0.017 7	0.068 3	0.001 6
33	0.073	0.318	96.568	0.057 2	0.001 4	0.553 7	0.016 9	0.070 0	0.001 6
34	0.111	0.000	15.586	0.074 9	0.005 2	0.719 9	0.055 9	0.070 1	0.002 1
35	0.026	0.026	2.374	0.075 3	0.011 2	0.778 4	0.114 9	0.072 1	0.003 7

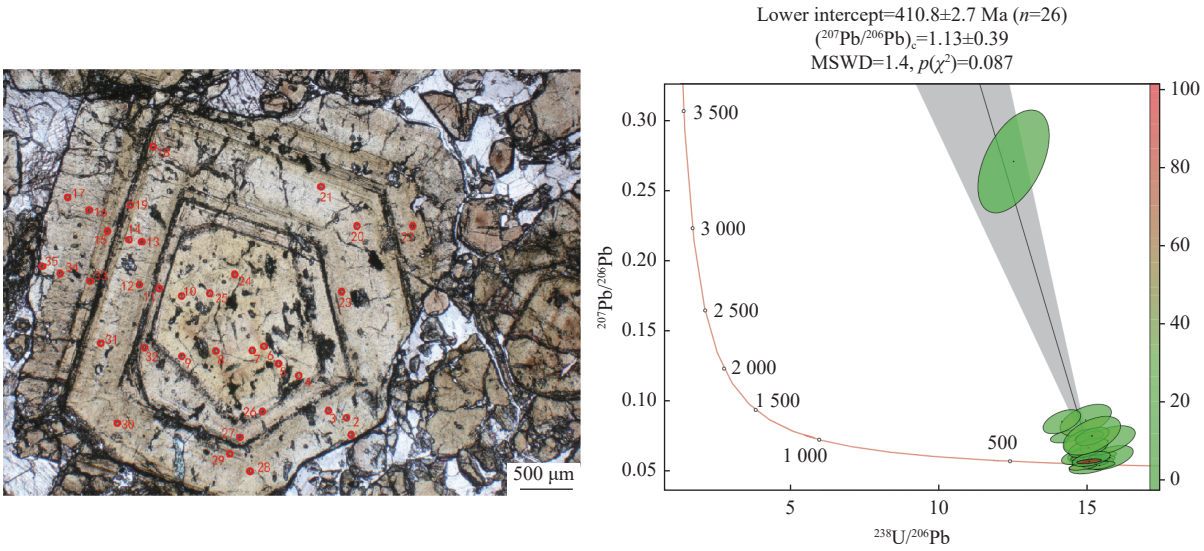


图7　石榴子石 U-Pb 同位素定年测试点位和反谐和图

Fig. 7　U-Pb isotopic dating test position and disharmonic diagram of garnet

2σ)(图 7)。

4.2　磁铁矿原位微量元素分析测试结果

共挑选两块磁铁矿化样品 21-14-7 和 21-14-10, 磁铁矿皆呈半自形产出, 多与阳起石、透闪石共生, 其中 21-14-7 与他形黄铜矿共生, 两者皆采自楚拉克矿点, 为该矿点磁铁矿的典型代表。

本次测试主要分析的元素为以下 25 种: Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Ga、Ge、Sn、La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu, 其中, 稀土元素 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 的含量均低于检测限, 其他元素的含量如表 2、图 8 所示。

5　讨论

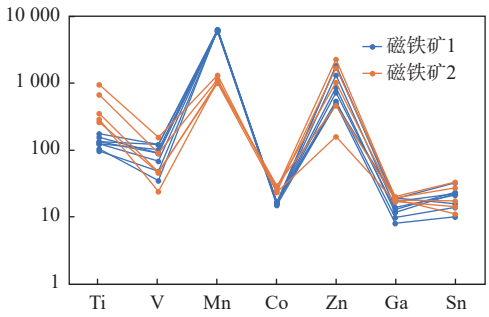
5.1　矿床成因类型

楚拉克矿点的岩石组合和地层岩性包括石榴子石片岩、云母片岩和大理岩等, 这些围岩类型是矽卡岩矿床常见的围岩类型。该矿点中出现了大量的石榴子

表 2　楚拉克矿点磁铁矿主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析测试结果

Tab. 2　Main element (%) and trace element (10^{-6}) analysis test results of magnetite ore at Chulak Mineralization Point

点号	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	Ga	Ge	Sn
21-14-10Mag-2-1	125	67.9	/	0.64	71.2	15.7	/	1 331	13.9	11.6	21.1
21-14-10Mag-2-2	97.4	48.4	/	0.62	71.2	16.5	/	1 810	16.8	10.1	22.2
21-14-10Mag-2-3	105	34.8	/	0.63	71.3	16.6	/	858	11.8	8.8	22.5
21-14-10Mag-2-4	154	90.9	/	0.63	70.4	16.6	/	484	19.3	11.2	15.9
21-14-10Mag-3-1	174	120	/	0.63	71.2	15.6	/	722	12.8	8.33	23.4
21-14-10Mag-3-2	123	102	/	0.60	71.3	15	/	484	8.11	7.88	9.99
21-14-10Mag-3-3	135	89.8	/	0.61	70.9	16.4	/	541	9.88	5.02	13.9
21-14-10Mag-3-4	134	120	/	0.59	71.2	15.8	/	1 845	18.8	5.67	32
21-14-7-2Mag-2-1	358	47.3	/	0.10	71.9	23.7	177	161	16.9	3.07	14.1
21-14-7-2Mag-2-2	287	24	/	0.11	71.8	28.2	124	1 033	18	3.52	17.4
21-14-7-2Mag-2-3	262	45.6	34.7	0.11	72.0	29.2	180	461	18.2	4.97	11.2
21-14-7-2Mag-4-1	963	155	/	0.13	71.8	24	/	1 703	20.1	/	33.1
21-14-7-2Mag-4-2	679	90.9	/	0.11	71.7	26.5	/	2 275	19.2	/	26.9



磁铁矿 1.铁铜矿点矿体南部样品 21-14-10；磁铁矿 2.铁铜矿点矿体南部样品 21-14-7

图8 楚拉克铁铜矿点磁铁矿微量元素蛛网图

Fig. 8 Trace element spider diagram of magnetite from the Chulake iron-copper deposit

石、阳起石、透闪石等典型的矽卡岩矿物，这些矿物的形成与矽卡岩矿床的成因密切相关。矿石矿物包括磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿等，与矽卡岩矿床中常见的矿物组合一致。该矿点成矿阶段主要划分为干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段、石英–方解石阶段，符合矽卡岩型矿床多阶段成矿的特点。

磁铁矿微量元素图解可以判别磁铁矿的成因类型，而磁铁矿的成因类型会显著影响 Sn 和 Ga 的分布特征。Sn 和 Ga 的分布特征主要受到热液流体成分、温度条件、流体和围岩相互作用等因素的影响。Sn 和 Ga 作为亲流体元素，其在磁铁矿中的浓度受成矿流体的化学性质和组分影响。由于 Sn 在氯化物络合物中具有较高的溶解性，Sn 主要与还原性较强、富含 F^-、Cl^-的热液体系相关（Nadoll et al., 2014）。高氧逸度会抑制 Sn 的沉淀，而低氧逸度条件则会促进 Sn 在磁铁矿晶格中的进入（Dupuis et al., 2011）。Ga 倾向于与酸性流体环境中的 Al^{3+}和 Fe^{3+}竞争位置，且易于在低氧逸度条件下稳定（Nadoll et al., 2012）。Ga 的行为则更多依赖于 Fe 的氧化态和晶格位置的竞争性占据。此外，Sn 和 Ga 的分布对于温度条件具有高度敏感性。高温条件下（如 400 ℃ 以上的热液体系），Sn 和 Ga 更容易通过扩散进入磁铁矿晶格。温度下降时，这些元素可能偏向形成独立矿物包裹体或者以非晶质状态存在（Dupuis et al., 2011; Nadoll et al., 2014）。流体和围岩交互作用也是控制 Sn 和 Ga 等成矿元素行为的关键过程。例如，由于围岩中某些矿物的溶解导致的 Mg^{2+}、Ca^{2+}、Fe^{2+}等元素进入流体、流体内作为络合剂的 F^-、Cl^-的含量变化以及流体 pH、温度、氧逸度的变化都会影响 Sn 和 Ga 溶解、运输、沉淀。

磁铁矿 Sn-Ga 的二元图解，可以作为矿床类型的判别依据。在上述因素的共同作用下，不同成因类型的矿床中磁铁矿内 Sn 和 Ga 的分布特征有着显著差异，主要有着以下表现：①BIF 型铁矿床形成于远古海洋的氧化性环境，主要通过化学沉淀形成，缺乏复杂的热液活动和金属元素富集的动力。此外，其流体中缺乏 F^-和 Cl^-等络合剂，Sn 和 Ga 溶解和迁移能力极低。因此，BIF 型铁矿床内的磁铁矿内的 Sn、Ga 的含量极低。②银铅锌热液矿床的流体以 NaCl 为主，缺乏高效的 Sn 和 Ga 络合剂（如 F^-）同时金属元素以 Pb、Zn 为主，Sn 和 Ga 的竞争性捕获位点较少。此外，在高氧逸度和低温环境下，Sn 以 Sn^{4+}形式存在，易沉淀为锡石，而非进入磁铁矿晶格。因此，银铅锌热液矿床内的磁铁内的 Sn、Ga 的含量较低。③钙矽卡岩型矿床的富 Ca 围岩与酸性流体交互作用，释放 Ca^{2+}，导致流体 pH 升高，增强 Sn-F 和 Sn-Cl 络合物的稳定性。中高温（300~500 ℃）和低氧逸度环境促进 Sn^{2+}和 Ga^{3+}的沉淀，但竞争性元素（如 Fe、Cu）限制了 Ga 的捕获效率。因此，钙矽卡岩型矿床内的磁铁内的 Sn、Ga 的含量呈中等水平。④镁矽卡岩型矿床相较于钙矽卡岩矿床有着富 Mg 的围岩，减少了对 F^-和 Cl^-络合剂的竞争，使 Sn 以 Sn-F 和 Sn-Cl 络合物形式保持高溶解度。在低氧逸度和适中温度条件下，Sn^{2+}通过扩散进入磁铁矿晶格的效率高。Ga 的溶解度受限于围岩化学环境，且其捕获受 Fe^{3+}的竞争抑制。因此，相较于钙矽卡岩矿床，镁矽卡岩型矿床内的磁铁矿的 Sn 含量略高，而 Ga 含量则略低。⑤中酸性的钙碱性岩浆内并不富含 Sn、Ga。斑岩 Cu-Au 矿床的高温流体（400～600 ℃）限制了 Sn 和 Ga 的稳定性，早期成矿阶段 Sn 以锡石等形式沉淀，Ga 更多富集于硅铝酸盐矿物，而流体中的 Cl^-主要用于 Cu 的络合作用，Sn 和 Ga 的络合能力较弱。因此，斑岩 Cu-Au 矿床内的 Sn 含量水平中等偏下，Ga 含量水平中等。⑥相比于斑岩 Cu-Au 矿床，Climax 型钼矿床由高分异的富 Si 碱性花岗岩浆形成，这类岩浆富含挥发分（如 F、Cl）和亲石元素（如 Sn、Ga、W）。低温（约 300 ℃）和低氧逸度环境使 Sn^{2+}和 Ga^{3+}以类质同象方式被捕获在磁铁矿晶格中。因此，Climax 型钼矿床磁铁矿内的 Sn、Ga 含量相对极高。

两份磁铁矿化样品中磁铁矿的 Sn 和 Ga 的微量元素投点均位于钙矽卡岩型矿床的范围内（图 9），说明楚拉克矿点的磁铁矿均为热液成因，进一步佐证了该矿点为矽卡岩型铁铜多金属矿点的结论。

5.2　成矿年代及其对区域找矿的意义

石榴子石是矽卡岩型矿床最早期结晶的标志性矿物, 同时也是在矽卡岩矿床中分布较为广泛的矿物。同时拥有着较高的 U-Pb 同位素封闭温度, 远远高于矽卡岩形成的温度, 其 U-Pb 同位素定年的结果不会受到热液交代作用和变质作用的影响, 具有很好的 U-Pb 同位素定年的潜力, 可以准确限定矽卡岩接触交代作用的开始时间(刘益等, 2021)。因此, 笔者利用 LA-ICP-MS 来对石榴子石进行 U-Pb 同位素定年来确定矽卡岩的形成时代。石榴子石 U-Pb 定年的结果表明该矽卡岩矿点的年龄为(410.8±2.7)Ma, 是早泥盆纪—晚志留纪形成的矿床。前人研究表明, 加里东期是祁漫塔格地区重要的成矿期(高永宝等, 2010; 何书跃等, 2018)。结合石榴子石的定年结果可以确定, 该矽卡岩矿点是加里东晚期中酸性侵入岩岩浆作用的结果。

根据对前人研究的统计结果可知, 东昆仑地区目前发现的矽卡岩矿床的成矿年龄大部分集中在 210～240 Ma(表 3), 主要成矿时代为三叠纪, 典型的有朵林格铁多金属矿床、肯德科克铁多金属矿床、野马泉铁多金属矿床和虎头崖铜多金属矿床等。只有少数矿床, 如群力铁多金属矿床的成矿年龄在(407.0±2.8)Ma(何书跃等, 2018), 成矿时代为早泥盆纪。

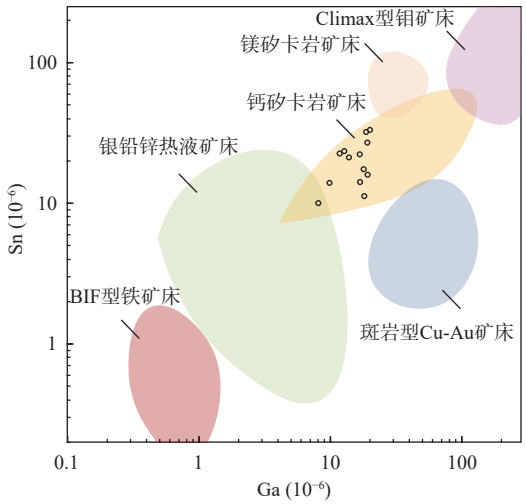


图9　磁铁矿 Sn-Ga 微量元素图解(据 Patrick et al., 2014)

Fig. 9　Diagram of Sn-Ga trace elements in magnetite

东昆仑祁漫塔格地区发现的矽卡岩型矿床大多形成于印支期, 时间范围约为 210～240 Ma。印支期是一个重要的地质时期, 该区域这一时期的地质构造运动和岩浆活动非常活跃, 这为矿床的形成提供了良好的条件。印支期的构造运动导致地壳的大规模变形和频繁的岩浆侵入活动, 这些构造运动创造了有利的成矿环境, 使得热液可以通过断裂和裂隙进入围岩, 并在适宜的条件下形成矿床。印支期的岩浆活动为

表 3　东昆仑地区矽卡岩矿床年代统计表

Tab. 3　Chronological statistics of skarn deposits in East Kunlun area

序号	矿床名称	年龄(Ma)	岩(矿)石	测试对象	测试方法	文献来源
1	朵林格铁多金属矿床	229.4±0.8	花岗闪长岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	赵一鸣等，2013
2	肯德科克铁多金属矿床	229.5±0.5	二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	肖晖等，2013
3	肯德科克铁多金属矿床	225±2.9	石榴子石矽卡岩	石榴子石	LA-ICP-MS U-Pb	Zhang et al.，2024
4	野马泉铁多金属矿床	229.5±1.1	二长花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	高永宝等，2012
5	野马泉铁多金属矿床	222.0±1.3	磁铁矿金云母脉	金云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	刘建楠等，2013
6	虎头崖铜多金属矿床	219.2±1.4	二长花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	丰成友等，2011
7	虎头崖铜多金属矿床	225±4	矽卡岩铜钼矿床	辉钼矿	Re-Os	丰成友等，2011
8	卡尔却卡铜多金属矿床	237±2	花岗闪长岩	锆石	SHRIMP U-Pb	王松等，2009
9	卡尔却卡铜多金属矿床	239±11	铜钼矿石	辉钼矿	Re-Os	丰成友等，2011
10	维宝铜铅锌多金属矿床	227.6±2.3	花岗闪长岩	锆石	SIMS U-Pb	周建厚等，2015
11	群力铁多金属矿床	407.0±2.8	正长花岗岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	何书跃等，2018
12	景忍–迎庆沟多金属矿床	230～225	二长花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	丰成友等，2011
13	四角羊–牛苦头铁多金属矿床	214.2±1.3	二长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	蒋成伍，2013
14	小卧龙矽卡岩锡多金属矿床	258±3.7	二长花岗岩	锡石	LA-ICP-MS U-Pb	国显正，2020
15	于沟子铁–稀有多金属矿床	210.1±4.8	钾长花岗岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	钱兵等，2015
16	小圆山铁多金属矿床	217.7±1.1	英云闪长岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	孔会磊等，2016
17	它温查汉铁多金属矿床	230.7±2.0	磁铁矿矽卡岩	白云母	$^{40}Ar/^{39}Ar$	田承盛等，2013
18	哈西亚姆图铁多金属矿床	240.1±0.8	花岗闪长岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	南卡俄吾等，2015
19	黑石山铜多金属矿床	241.6±1.0	闪长岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	李治华等，2023
20	乌兰乌珠尔铜多金属矿床	215.1±4.5	花岗斑岩	锆石	LA-ICP-MS U-Pb	郭通珍等，2011
21	鸭子沟铜多金属矿床	224.0±1.6	花岗岩	锆石	SHRIMP U-Pb	李世金等，2008

矿床提供了丰富的热液流体,这些热液流体在侵入过程中与围岩发生反应,形成了大量的矽卡岩矿物。这些矽卡岩矿床的形成表现出统一的成矿时代特征,反映了印支期特定的地质背景和成矿条件对矿床的影响。

本次通过石榴子石 U-Pb 同位素定年技术,确定东昆仑祁漫塔格地区发现的铁铜矿点成矿时间约为(410.8±2.7)Ma,对应加里东晚期。加里东晚期,祁漫塔格地区处于弧后裂陷环境向碰撞挤压环境过渡的构造背景(高宏昶,2021)。早期的弧后裂陷环境在东昆北带发育了强烈的火山作用和大量的陆源沉积,为成矿元素的初始富集提供了基础。随着加里东晚期原特提斯洋闭合,区域构造转变为同碰撞背景,大规模的岩浆活动主要由俯冲板片断离形成的“板片窗”引发,幔源物质上涌和地壳部分熔融共同提供了丰富的成矿物质(伍跃中等,2011;高宏昶,2021)。该时期岩浆侵入活动受控于区域构造带,尤其是 NE 向和 NW 向断裂带,这些构造带不仅为岩浆流体的运移提供了通道,还增强了热液活动的成矿作用(伍跃中等,2011)。岩浆活动主要以 I 型和(A+S)型花岗岩为主,这些岩体的高温特性和富含挥发成分为成矿元素的迁移提供了热源和流体(乔耿彪等,2010)。通过与围岩的交代作用,岩浆流体将 Ca、Fe、Mg 等元素从碳酸盐围岩中提取,形成了典型的矽卡岩矿物和金属硫化物矿体(高宏昶,2021)。这种岩浆–围岩的交互作用,结合构造环境的变化,促使了矽卡岩型矿床的成矿作用和矿床类型的空间分布,为区域成矿研究提供了重要的理论依据。新矿点的发现表明,在加里东晚期,东昆仑祁漫塔格地区也经历了显著的成矿活动。这是东昆仑祁漫塔格地区新近发现的形成于加里东晚期的矽卡岩矿点,具有重要的地质和找矿意义。该矿点的发现不仅拓展了该地区的成矿时代范围,还提供了新的成矿理论依据,表明在不同时期,区域内的成矿活动具有多样性。

6 结论

(1)本次发现的楚拉克矿点内的主要矿物组合为黄铁矿、黄铜矿、铜蓝、阳起石、透闪石和石榴子石,该矿床成矿阶段可以划分为干矽卡岩阶段、湿矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段、石英–方解石阶段和表生期,结合磁铁矿 Sn-Ga 微量元素图解可以判断该矿床为矽卡岩型铜铁矿床。

(2)石榴子石 U-Pb 定年结果表明,该矽卡岩型矿床的年龄为(410.8±2.7)Ma,是加里东晚期中酸性侵入岩岩浆作用的结果。

(3)该矿点富含铜、铁、锌等重要金属元素,具有较大的找矿潜力,为进一步的找矿工作提供了科学依据。新矿点的发现为该地区的找矿工作提供了新的方向和思路,拓宽了找矿空间。

致谢:感谢曹盛轩、丰效坤、张儒林等师兄在野外的找矿工作和样品采集工作。

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):

丰成友,赵一鸣,李大新,等. 青海西部祁漫塔格地区矽卡岩型铁铜多金属矿床的矽卡岩类型和矿物学特征[J]. 地质学报, 2011, 85(7): 1108−1115.

FENG Chengyou, ZHAO Yiming, LI Daxin, et al. Skarn Types and Mineralogical Characteristics of the Fe-Cu-polymetallic Skarn Deposits in the Qimantage Area, Western Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(7): 1108−1115.

高宏昶. 青海东昆仑祁漫塔格地区内生金属矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.

GAO Hongchang. Study on metallogenesis of endogenetic metal deposits in the Qimantag aera, East Kunlun, Qinghai Province[D].Changchun: Jilin University. 2021.

高永宝,李文渊,李侃,等. 东昆仑野马泉铁矿有关花岗岩年代学、Hf 同位素及其地质意义[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 1021−1022.

GAO Yongbao, LI Wenyuan, LI Kan, et al. Etrology and Hf Isotope Geochronology of the Yemaquan Iron Mine in Dongkunlun and Its Geological Significance[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(S1): 1021−1022.

高永宝,李文渊,谭文娟. 祁漫塔格地区成矿地质特征及找矿潜力分析[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 35-43.

GAO Yongbao, LI Wenyuan, TAN Wenjuan. Metallogenic Characteristics and Analysis of the Prospecting Potential in the Area of Qimantage[J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 35-43.

古凤宝,吴向农,姜常义. 东昆仑华力西-印支期花岗岩组合及构造环境[J]. 青海地质, 1996, (1): 18−36.

GU Fengbao, WU Xiangnong, JIANG Changyi. Assemblages and Tectonic Environment of the Variscan-Indosinian Granitoid in the Eastern Kunlun[J]. Qinghai-Tibet Plateau, 1996, (1): 18−36.

郭通珍, 刘荣, 陈发彬, 等. 青海祁漫塔格山乌兰乌珠尔斑状正长花岗岩 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1203−1211.

GUO Tongzhen, LIU Rong, CHEN Fabin, et al. LA-MC-ICPMS Zircon U-Pb Dating and Geological Significance of the Porphyritic Syenogranite in the Qimantage Mountains, Qinghai[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(8): 1203−1211.

郭广慧, 钟世华, 李三忠, 等. 运用机器学习和锆石微量元素构建花岗岩成矿潜力判别图解: 以东昆仑祁漫塔格为例[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 57−70.

GUO Guanghui, ZHONG Shihua, LI Sanzhong, et al. Constructing Discrimination Diagrams for Granite Mineralization Potential by Using Machine Learning and Zircon Trace Elements: Example from the Qimantagh, East Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 57−70.

国显正. 东昆仑东段古特提斯中酸性岩浆活动与多金属成矿作用 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.

GUO Xianzheng. The Intermediate-acid Magmatism and Polymetallic Mineralization in East Kunlun, Paleo-Tethys [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.

何书跃, 李东生, 白国龙, 等. 青海祁漫塔格群力矿床矽卡岩中白云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄报道[J]. 中国地质, 2018, 45(1): 201−202.

HE Shuyue, LI Dongsheng, BAI Guolong, et al. Reported $^{40}Ar/^{39}Ar$ Ages of Muscovite in the Skarn of the Li Deposit, Qimantage Group, Qinghai[J]. Geology in China, 2018, 45(1): 201−202.

蒋成伍. 青海省格尔木市四角羊-牛苦头地区矽卡岩型铁多金属矿矿化特征及成矿模式研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2013.

JIANG Chengwu. Mineralization Characteristics of Skarn Type Iron Polymetallic & Metallogenic Model Research in Sijiaoyang - Niukutou District in Qinghai Province [D].Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

孔会磊, 李金超, 栗亚芝, 等. 青海祁漫塔格小圆山铁多金属矿区英云闪长岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 8−16.

KONG Huilei, LI Jinchao, LI Yazhi, et al. LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Dating and Its Geological Implications of the Tonalite from Xiaoyuanshan Iron-Polymetallic Ore District in Qimantag Mountain, Qinghai Province[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(1): 8−16.

李世金, 孙丰月, 丰成友, 等. 青海东昆仑鸭子沟多金属矿的成矿年代学研究[J]. 地质学报, 2008, 82(7): 949−955.

LI Shijin, SUN Fengyue, FENG Chengyou, et al. Fluid inclusion studies of porphyry copper mineralization in Kaerqueka polymetallic ore district, East Kunlun Mountains, Qinghai Province [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(7): 949−955.

李治华, 李碧乐, 李鹏, 等. 东昆仑黑石山铜多金属矿床闪长岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素[J]. 地球科学, 2023, 48(12): 4465−4480.

LI Zhihua, LI Bile, LI Peng, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Sr-Nd-Hf Isotopes of Diorite in Heishishan Copper Polymetallic Deposit, East Kunlun[J]. Earth Science, 2023, 48(12): 4465−4480.

刘建楠, 丰成友, 赵一鸣, 等. 青海野马泉矽卡岩铁锌多金属矿区侵入岩、交代岩及矿化蚀变特征[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 77−93.

LIU Jiannan, FENG Chengyou, ZHAO Yiming, et al. Characteristics of intrusive rock, metasomatites, mineralization and atteration in Yemaquan skarn Fe-Zn polymetallic deposit, Qinghai Province [J]. Mineral Deposits, 2013, 32(1): 77−93.

刘鹏, 吕志成, 董树义, 等. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿床流体包裹体特征及成矿机制研究[J]. 矿床地质, 2020, 39(5): 825−844.

LIU Peng, LV Zhicheng, DONG Shuyi, et al. 2020. Fluid inclusion characteristics and metallogenic mechanism of Hutouya skarn Pb-Zn polymetallic deposit, Qimantag, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2020, 39(5): 825−844.

刘益, 孔志岗, 陈港, 等. 滇东南官房钨矿床石榴子石原位 LA-SF-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(3): 847−864.

LIU Yi, KONG Zhigang, CHEN Gang, et al. In-situ LA-SF-ICP-MS U-Pb dating of garnet from Guanfang tungsten deposit in southeastern Yunnan Province and its geological significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(3): 847−864.

莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 43−51.

MO Xuanxue, PAN Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-TibetPlateau:constrainedbytectono-magmaticevents[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 43−51.

南卡俄吾, 贾群子, 唐玲, 等. 青海东昆仑哈西亚图矿区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄与岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 2015, 42(3): 702−712.

NAMHKA Norbu, JIA Pangzi, TANG Ling, et al. Zircon U-Pb age and geochemical characteristics of granodiorite from the Haxiyatu iron-polymetallic ore district in Eastern Kunlun[J]. Geology in China, 2015, 42(3): 702−712.

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): 1−16.

PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, et al. Division of Tectonic Units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1−16.

潘裕生, 周伟明, 许荣华, 等. 昆仑山早古生代地质特征与演化[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 1996, (4): 302−307.

PAN Yusheng, ZHOU Weiming, XU Ronghua, et al. Geological Characteristics and Evolution of the Early Paleozoic in the Kunlun Mountains[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 1996, (4): 302−307.

钱兵, 高永宝, 李侃, 等. 新疆东昆仑于沟子地区与铁-稀有多金属成矿有关的碱性花岗岩地球化学、年代学及 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2508−2520.

QIAN Bing, GAO Yongbao, LI Kan, et al. Zircon U-Pb-Hf isotopes and whole rock geochemistry constraints on the petrogenesis of

iron-rare metal mineralization related alkaline granitic intrusive rock in Yugouzi area, eastern Kunlun, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2508−2520.

乔耿彪, 伍跃中. 东昆仑祁漫塔格地区花岗岩成因类型对成矿作用的控制[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 134−142.

QIAO Gengbiao, WU Yuezhong. Genetic Types of Granite Controlled the Mineralization in Qimantage Area, Eastern Kunlun [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(4): 134−142.

田承盛, 丰成友, 李军红, 等. 青海它温查汉铁多金属矿床～(40)Ar-～(39)Ar 年代学研究及意义[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 169−176.

TIAN Chengsheng, FENG Chengyou, LI Junhong, et al. ^{40}Ar-^{39}Ar geochronology of Tawenchahan Fe-polymetallic deposit in Qimantag Mountain of Qinghai Province and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(1): 169−176.

田龙, 康磊, 刘良, 等. 东昆仑巴什尔希晚奥陶世二长花岗岩成因及其地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(2): 28−45.

TIAN Long, KANG Lei, LIU Liang, et al. Petrogenesis and Geological Implications of Bashenerxi Monzogranite from East Kunlun Orogen Belt[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(2): 28−45.

王松, 丰成友, 李世金, 等. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 74−84.

WANG Song, FENG Chengyou, LI Shijin, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 74−84.

王新雨, 王书来, 吴锦荣, 等. 青海省牛苦头铅锌矿床成矿时代研究: 来自成矿岩体年代学和黄铁矿 Re–Os 地球化学证据[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 71−81.

WANG Xinyu, WANG Shulai, WU Jinrong, et al. Mineralization Age and Ore forming–Source of Niukutou Pb–Zn Deposit, Qinghai: Evidence from Geochronology of Ore–forming Rock Bodies and Re–Os Geochemistry of Pyrite[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 71−81.

伍跃中, 乔耿彪, 陈登辉. 东昆仑祁漫塔格地区构造岩浆作用与成矿关系初步探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2): 232−241.

WU Yuezhong, QIAO Gengbiao, CHEN Denghui. A preliminary study on relationship between tectonic magmatism and mineralization in Qimantage area, Eastern Kunlun Mountains[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2011, 35(2): 232−241.

肖晔, 丰成友, 刘建楠, 等. 青海肯德可克铁多金属矿区年代学及硫同位素特征[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 177−186.

XIAO Ye, FENG Chengyou, LIU Jiannan, et al. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and sulfur isotope characteristics of Kendekeke Fe-polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(1): 177−186.

许骏, 邓小华, 祝新友. 祁漫塔格成矿带地质特征和成矿时空分布规律[J]. 新疆地质, 2021, 39(4): 671−678.

XU Jun, DENG Xiaohua, ZHU Xinyou. Geological Characteristics and Spatio-Temporal Distribution of Mineralization in the Qimantage metallogenic Belt[J]. Xinjiang Geology, 2021, 39(4): 671−678.

薛培林, 肖静, 薛福林, 等. 青海祁漫塔格-都兰成矿带铜矿找矿前景初探[J]. 矿产与地质, 2006,20(3): 247−250.

XUE Peilin, XIAO Jing, XUE Fulin, et al. Outlook on copper deposit exploration in Qimantage-Dulanorebelt[J]. Mineral Resources And Geology, 2006,20(3): 247−250.

赵一鸣, 丰成友, 李大新, 等. 青海西部祁漫塔格地区主要矽卡岩铁多金属矿床成矿地质背景和矿化蚀变特征[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 1−19.

ZHAO Yiming, FENG Chengyou, LI Daxin, et al. Metallogenic setting and mineralization-alteration characteristics of major skarn Fe-polymetallic deposits in Qimantag area, western Qinghai Province[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(1): 1−19.

周建厚, 丰成友, 沈灯亮, 等. 新疆祁漫塔格维宝矿区西北部花岗闪长岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地质学报, 2015, 89(3): 473−486.

ZHOU Jianhou, FENG Chengyou, SHEN Dengliang, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications of Granodiori-te in the Northwest of Weibao Deposit, Xinjiang Qimantage[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(3): 473−486.

Deng X D, Li J W, Luo T, et al. Dating magmatic and hydrothermal processes using andradite-rich garnet U–Pb geochronometry[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 2017, 172(9): 71.

Dupuis C, Beaudoin G. Discriminant diagrams for iron oxide trace element fingerprinting of mineral deposit types[J]. Mineralium Deposita, 2011, 46: 319−335.

Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34−43.

Nadoll P, Mauk J L, Hayes T S, et al. Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States[J]. Economic Geology, 2012, 107: 1275−1292.

Nadoll P, Angerer T, Mauk L J, et al. The chemistry of hydrothermal magnetite: A review[J]. Ore Geology Reviews, 2014, 611−632.

Yan S, Zhou R, Niu H C, et al. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of low-U garnets reveals multiple episodes of skarn formation in the volcanic-hosted iron mineralization system, Awulale belt, Central Asia[J]. Bulletin, 2020, 132(5−6): 1031−1045.

Zhang R, Yuan F, Deng Y, et al. Implications of garnet composition on metallogenic chronology and ore-forming fluid evolution of skarn deposits: A case study of the Kendekeke Fe-polymetallic deposit in East Kunlun[J]. Ore Geology Reviews, 2024, 168106020.