

doi: 10.12097/gbc.2024.09.005

东昆仑三叠纪斑岩成矿系统及成矿模式

马忠元¹, 张金阳^{2*}, 张勇¹, 马强¹, 李军¹

MA Zhongyuan¹, ZHANG Jinyang^{2*}, ZHANG Yong¹, MA Qiang¹, LI Jun¹

1. 青海省第三地质勘查院, 青海 西宁 810029;

2. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074

1. The Third Institute of Qinghai Geological Prospecting, Xining 810029, Qinghai, China;

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:【研究目的】古特提斯构造演化在东昆仑造山带引发了重要的斑岩岩浆-成矿作用,形成了复杂多样的矿化类型和丰富的矿产资源,目前,尚未对斑岩成矿时代、成矿特征开展系统的梳理和总结。为提高对东昆仑地区斑岩型矿床成矿系统及成矿模式的认识,【研究方法】在收集前人资料的基础上,进行了致矿斑岩、斑岩型矿床时空分布、成矿类型及成矿规律总结,以及古特提斯构造演化与斑岩成矿过程关系研究。【研究结果】东昆仑地区致矿斑岩及斑岩型矿床处于昆北岩浆弧和昆中岩浆弧,形成时代集中在236~218 Ma之间,主要形成了斑岩型铜矿、斑岩型钼矿、斑岩型铜钼矿、斑岩型铜金矿、斑岩型铜锡矿5种类型,已发现的矿体主要产于斑岩体顶部或边部不同方向的次级构造破碎带内,断裂构造是最主要的控矿因素。与斑岩成矿系统有关的矿化类型包括斑岩型、矽卡岩型、隐爆角砾岩型和浅成低温热液脉型,其中,浅成低温热液脉型银铅锌矿规模常达到大型—超大型。【结论】研究认为,同碰撞造山早期俯冲板片断离引起软流圈地幔上涌,诱发富集地幔的局部熔融和后碰撞伸展阶段岩石圈拆沉引起软流圈上涌,底侵的幔源岩浆将大量成矿物质带入地壳,使被流体交代发生富集作用的新生下地壳重熔,是诱发斑岩矿床成矿最主要的动力学背景。据此建立了与中—酸性斑岩岩浆侵入活动有关的斑岩型-矽卡岩型-隐爆角砾岩型-浅成低温热液脉型矿床深部成矿动力学模型和浅部成矿模式。

关键词: 斑岩型矿床; 成矿规律; 成矿系统; 成矿模式; 三叠纪; 东昆仑

创新点: 总结了东昆仑造山带三叠纪斑岩成矿系统的地质特征,研究了成矿作用过程,并建立了成矿模式。

中图分类号: P612; P617 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2025)04-0534-18

Ma Z Y, Zhang J Y, Zhang Y, Ma Q, Li J. Metallogenic system and metallogenic model of Triassic porphyry deposits in the East Kunlun orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(4): 534–551

Abstract: [Objective] The PaleoTethys tectonic evolution triggered important porphyry magma–mineralization in the East Kunlun orogenic belt, resulting in strong magmatic activity, complex and diverse mineralization types and endowment mineral resources. At present, a systematic review and summary of the diagenetic and mineralization ages and mineralization characteristics of porphyry have not yet been carried out. In order to enhance our understanding of the mineralization system and mineralization model of porphyry–type deposits in the Eastern Kunlun area. [Methods] On the basis of collecting previous data, this paper summarizes the spatial and temporal distribution, metallogenic types and metallogenic rules of ore–producing porphyry and porphyry type deposits, and studies the evolution of paleo–Tethys structure and porphyry mineralization process. [Results] The ore–producing porphyry and porphyry deposits in East Kunlun area are located in the northern and central Quinqueinian magmatic arcs, and their ages are concentrated between 218 Ma and 236 Ma. Mainly formed porphyry Cu, porphyry Mo, porphyry Cu–Mo, porphyry Cu–Au, porphyry Cu–Sn deposit five types, the

收稿日期: 2024-09-06; 修订日期: 2024-11-05

资助项目: 青海省昆仑英才“高端创新创业人才计划”项目《青藏高原北缘三叠纪斑岩铜多金属矿成矿作用研究》(编号: 青地矿[2024]118号)和青海省第三地质勘查院自筹科研项目(编号: SKYZC-2022-007)

作者简介: 马忠元(1989–), 男, 高级工程师, 从事矿产勘查与研究工作。E-mail: 44572386@qq.com

* 通信作者: 张金阳(1977–), 男, 博士, 教授, 从事造山带侵入岩与岩浆矿床研究。E-mail: zhangjinyang@cug.edu.cn

discovered ore bodies are mainly located in the top or side of the porphyry tectonic belt, the structure is the most important ore-controlling factor, the size of the porphyry-related low-temperature vein type Ag-Pb-Zn mineralization often reaches large-super large. **[Conclusions]** It is considered that the most important dynamic background for the mineralization of porphyry deposits is the partial melting of mantle enrichment induced by asthenosphere mantle upgassing caused by subduction plate fragmentation in early collision orogeny and the partial melting of new crust and thickened lower crust induced by asthenosphere upgassing in post-collision extension stage. The metallogenic model of porphyry type, skarn type, cryptoexplosive breccia type and epithermal vein type deposit was established.

Key words: porphyry deposit; metallogenic regularity; metallogenic system; metallogenic model; Triassic period; East Kunlun

Highlights: The geological characteristics of the Triassic porphyry mineralization system in the East Kunlun Orogenic Belt were summarized, the mineralization process was studied, and a mineralization model was established.

斑岩型矿床一直是国际矿床学界和矿业界关注的热点,斑岩成矿系统以斑岩矿床为中心,向外围产出矽卡岩与浅成低温热液等矿床,主要的矿化元素除 Cu 外,还富含大量的 Mu、Au、Pb、Zn、Ag 等矿化元素,是目前最具经济价值的矿床类型之一。斑岩型矿床主要产于大洋板片俯冲形成的岩浆弧环境(主要包括岛弧和陆缘弧环境)(Cooked et al., 2005; Richards, 2013),也产于与俯冲无关的非弧环境(主要包括碰撞造山环境、陆内造山环境、活化克拉通边缘及板内环境)(Gao et al., 2013; Zhou et al., 2015; Hou et al., 2017)。后者发育于中国大陆,以西藏冈底斯成矿带和玉龙成矿带为典型代表(张洪瑞等, 2010)。

东昆仑造山带是与冈底斯相媲美的一条巨型构造岩浆岩带(莫宣学等, 2007),地处古亚洲构造域与特提斯构造域的结合部位,具有复杂的地质构造演化历史。先后经历了前南华纪、南华纪—泥盆纪、石炭纪—三叠纪和侏罗纪—第四纪 4 个构造旋回(潘彤等, 2019),它们分别对应 Rodinia 超大陆裂解事件以后,特提斯构造域多阶段演化对东昆仑增生造山作用的响应。在构造演化过程中,随着特提斯洋的俯冲、碰撞,陆壳的加厚、幔源岩浆的底侵及岩石圈的撕裂、拆沉形成了强烈的岩浆活动(谌宏伟等, 2005),发育复杂多样的矿化类型和丰富的矿产资源。

2010 年以来,东昆仑造山带斑岩型矿床找矿取得重大突破,陆续发现并评价了卡而却卡(张大明等, 2020)、哈日扎(马忠元等, 2023a, b, 2024a)、那更康切沟、乌兰乌珠尔-十字嵩(马忠元等, 2024a, b)等一系列大中型矿床,尤其与斑岩侵入活动有关的热液脉型银铅锌矿往往达到大型矿床规模。

前人研究认为,东昆仑造山带斑岩的侵位时间分为加里东期、华力西期及印支期—燕山期,其中印支期—燕山期斑岩较发育,加里东期、华力西期分布

较少(袁万明等, 2017);东昆仑造山带广泛发育与印支期—燕山期花岗岩有关的斑岩型-矽卡岩型-热液脉型矿床,成矿元素主要为 Cu、Mo、Sn、Fe、Pb、Zn、Au 和 Ag(邓军等, 2016; Wang et al., 2018)。

随着矿产勘查与地质研究程度的不断提高,尤其是高精度测年技术的发展,对东昆仑造山带斑岩矿床成岩成矿时代和成矿作用等的研究有了新的认识。为此,本文在收集前人资料的基础上,进一步总结东昆仑斑岩成岩成矿时代,划分斑岩成矿类型,讨论斑岩成矿作用过程,建立区域成矿模式,探讨东昆仑三叠纪斑岩成岩成矿的背景,为促进成矿规律总结和找矿突破提供参考。

1 地质背景

东昆仑造山带位于青藏高原北缘青海省中西部(图 1-a),呈近东西向展布于东昆仑北坡—鄂拉山一带(才航加等, 2016),西起青新边界,向东止于兴海县尕斯羊曲附近,苦海-赛什塘断裂将其与西秦岭造山带分割;北部以昆北断裂为界与柴达木地块分开,南界以昆中断裂为界与康西瓦-修沟-磨子潭地壳对接带为邻(潘彤等, 2021)。该带两头宽、中间窄,呈“勺形”,东西长约 880 km,南北宽 70~190 km,面积 94699.27 km²,系中国大陆中央造山带西段(殷鸿福和张克信, 1997)一个具有复杂演化历史的多旋回复合造山带,主要经历了加里东—印支期复杂的演化过程,主造山期为晚华力西期—印支期。

东昆仑造山带出露最老的地层为古元古界金水口岩群,属于层状无序地层,构成了东昆仑地层区的变质结晶基底(Chen et al., 2017),分为片麻岩岩组、大理岩岩组及片岩岩组,岩性主要为斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、大理岩夹角闪片麻岩、石英岩、石英片岩。除古元古界外,广泛发育长城系小庙岩组,与

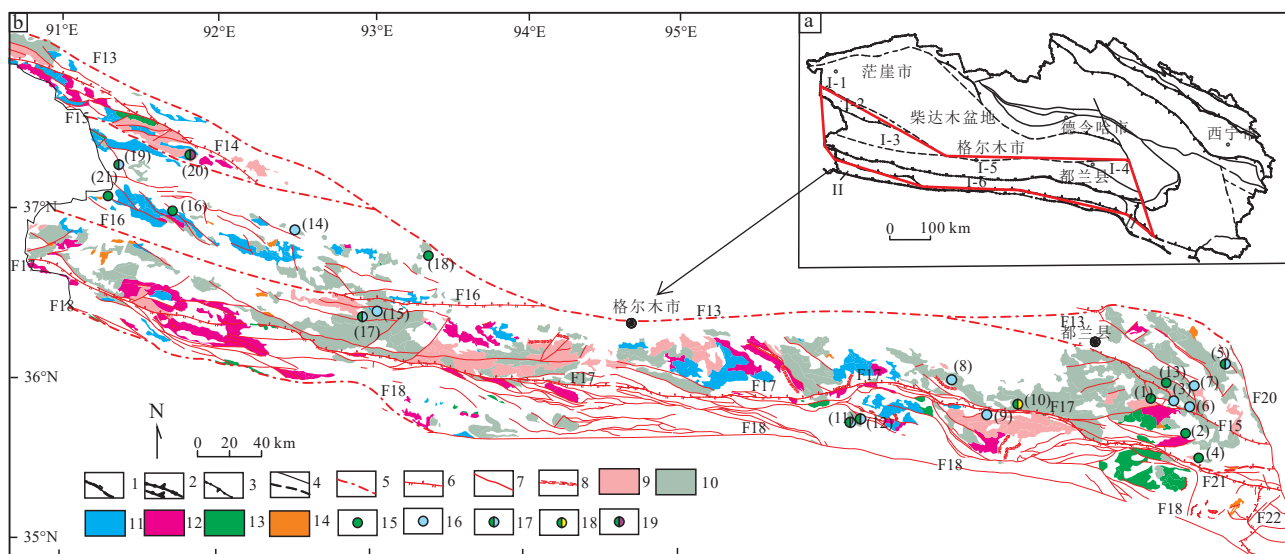


图 1 构造单元划分图 (a) 和东昆仑斑岩矿床地质矿产图 (b) (据潘彤等, 2021 修改)

Fig. 1 Construction unit division diagram (a) and geological and mineral map of porphyry deposit in East Kunlun (b)

F13—昆北断裂 (北支); F14—莲花石-小狼牙山南缘断裂; F15—阿达滩-乌兰乌珠尔南缘断裂; F16—昆北断裂 (南支); F17—昆中断裂; F18—昆南断裂; F20—哇洪山-温泉断裂; F21—温泉-祁家断裂; F22—苦海-赛什塘断裂; (1)—哈日扎矿床; (2)—那更康切尕尔沟矿床; (3)—哈隋休玛矿床; (4)—肉早某日-各玛龙矿床; (5)—加当根矿床; (6)—热水矿床; (7)—多龙恰柔矿床; (8)—清水河东沟矿床; (9)—益克郭勒矿床; (10)—托克妥矿床; (11)—下得波利矿床; (12)—埃坑德勒斯特矿床; (13)—扎玛休玛矿床; (14)—长山矿床; (15)—拉陵高里河沟脑矿床; (16)—莫河下拉矿床; (17)—家琪寺矿床; (18)—克停哈尔矿床; (19)—鸭子沟矿床; (20)—乌兰乌珠尔-十字嵩矿床; (21)—卡而却卡矿床。

1—板块边界断裂及俯冲方向; 2—早古生代造山带边界断裂及俯冲方向 (一侧有齿为单向俯冲, 两侧有齿为双向俯冲); 3—晚古生代—中生代造山带边界断裂及俯冲方向; 4—三级构造单元边界断裂 (实线) 及其他重要断裂或隐伏断裂 (虚线); 5—边界断裂; 6—逆断层; 7—性质不明断层; 8—韧性剪切带; 9—三叠纪岩浆岩; 10—二叠纪岩浆岩; 11—泥盆纪岩浆岩; 12—志留纪岩浆岩; 13—奥陶纪岩浆岩; 14—元古宙岩浆岩; 15—斑岩铜矿床; 16—斑岩钼矿床; 17—斑岩铜钼矿床; 18—斑岩铜金矿床; 19—斑岩铜锡矿床

下伏金水口岩群呈韧性剪切带接触, 蓟县系狼牙山组不整合其上。值得注意的是, 近年来, 在上奥陶统纳赤台群中发现含锰、钴岩系, 岩性主要为石英绢云母千枚岩、粉砂岩夹硅质岩、泥质板岩等 (李文等, 2024)。另外, 在东昆仑天台山一带发育一套高级变质杂岩, 呈透镜状分布于东昆仑北坡的天台山、跃进山、清水泉一带, 主要变质岩石为麻粒岩、变粒岩, 次为大理岩。在醉马滩—赛什塘—沙乃亥一带出露一套中深变质杂岩, 岩石组合为花岗质片麻岩, 亦呈基底形式出现。

东昆仑造山带经历了多次复杂而强烈的构造变形, 带内断裂构造十分发育, 密集成带分布, 韧性剪切带次之, 还发育短轴褶皱、片内无根褶皱及复杂的流褶皱。断裂主要有北西向、北西西向、近南北向和北东向 4 组, 其中以北西西向断裂构造最发育, 为区域主断裂带 (图 1), 控制了地质构造和地层分区, 而且对岩浆活动及矿产的分布也起着控制作用, 具有切割深、延伸长和多期次活动的特点。北西向、北东向断裂通常以小断裂的形式出现, 形成时间晚, 常切

割北西西向断裂。

东昆仑造山带内岩浆活动强烈, 侵入岩广泛发育, 时代为中元古代—侏罗纪 (图 1-b), 以志留纪—泥盆纪与二叠纪—三叠纪岩体居多 (Shao et al., 2017)。岩浆活动对矿床的形成存在明显控制作用, 其中晚志留世—早泥盆世与铜镍钴成矿相关的镁铁—超镁铁质岩主要分布在夏日哈木、喀雅克登塔格、开木棋、苏海图、白日其利、跃进山、浪木日及大格勒地区, 与铈、稀土元素成矿有关的碱性岩—碳酸岩杂岩主要分布在大格勒地区, 岩体规模一般为 0.5~4 km²。二叠纪—三叠纪中酸性侵入岩特别发育, 与之有关的成矿作用发育有矽卡岩型铁多金属矿、斑岩型铜钼锡金矿、隐爆角砾岩型铅锌矿、热液脉型银多金属矿、造山型金矿等 (张爱奎等, 2023)。

2 东昆仑斑岩矿床地质特征

2.1 时空分布

截至目前, 东昆仑造山带已发现与斑岩岩浆侵入活动有关的矿床共 21 处 (图 1-b)。时间分布上致

矿斑岩形成时代在 244.2~212.3 Ma 之间(图 2; 表 1), 由老到新大致为斑岩铜-钼矿、斑岩铜-金矿、斑岩钼矿、斑岩铜矿、斑岩铜-锡矿的变化趋势。空间分布上斑岩矿床分布不均匀, 主要分布于造山带东、西两端, 大多数斑岩矿床处于昆北岩浆弧和昆中岩浆弧中, 昆南蛇绿混杂岩带仅有埃坑德勒斯特-下得波利斑岩型铜-钼矿床。

总体看, 东昆仑与中酸性斑岩岩浆活动有关的岩体及其矿化具有多期次多阶段特征(胡永达, 2007), 致矿斑岩年龄除昆南蛇绿混杂岩带的埃坑德勒斯特-下得波利矿床在 244.2~242 Ma 之间外, 集中在 236~218 Ma 之间, 属于晚三叠世。斑岩铜-钼矿床(244.2~224 Ma)、斑岩铜-金矿床(232.49 Ma)成矿时代普遍稍早于斑岩钼矿床(231.1~220 Ma)、斑岩铜矿床(229.5~217.4 Ma), 而斑岩铜-锡矿床成矿时代(212.9 Ma)最晚, 斑岩铜-钼矿床年龄整体较分化, 可能与古特提斯洋演化过程中的动力学背景差异有关。从不同成矿类型矿床中获得的热液锆石年龄看, 均稍晚于致矿斑岩体年龄, 说明东昆仑地区斑岩型-矽卡岩型-隐爆角砾岩型-浅成低温热液脉型矿产均为斑岩成矿系统中不同的成矿类型。

2.2 成矿岩体

斑岩型矿床中的致矿斑岩岩石类型较简单, 主要是花岗斑岩、花岗闪长斑岩和二长花岗斑岩, 其次是石英斑岩和流纹斑岩。致矿斑岩在部分矿区地表无出露(如托克妥斑岩铜金矿, 二长花岗斑岩在 0,

9 勘探线钻孔 200 m 以深处出现), 仅在钻孔深部见岩枝状斑岩; 在部分矿区地表有出露(哈日扎、乌兰乌珠尔-十字嵩、那更康切尔沟), 但多呈岩脉状、岩株状产出, 斑岩与周围岩石多呈侵入接触。致矿斑岩为斑状结构, 块状构造, 斑晶多为斜长石、钾长石、石英、绢云母等, 多呈半自形—他形晶, 大小一般为 0.5~3 mm, 星散状分布, 斑晶含量为 20%~30%。基质为斜长石、钾长石、石英, 大小一般为 0.02~0.06 mm。

2.3 断裂构造

东昆仑斑岩矿床中已发现的矿体以热液脉状矿为主, 主要产于斑岩体顶部或斑岩体边部的构造带内, 部分产于围岩中, 与致矿斑岩侵入有关的热液脉状矿赋存于下元古界金水口岩群、鄂拉山组火山岩层, 或是具张性断裂的花岗岩中, 可见对围岩不具有选择性。区域上经历了多次复杂而强烈的构造运动, 其中北西西向的压扭性断裂组成了区域上的主体构造骨架, 为致矿斑岩岩浆侵入提供了空间。岩浆上侵为成矿物质活化迁移富集提供了热动力, 同时导致地壳压力降低, 形成不同方向次级断裂和张性节理裂隙, 为成矿物质的活化、迁移、沉淀等提供了良好的通道和容矿空间。

2.4 矿化蚀变

斑岩成矿系统中常发育多期次的岩体侵位、多种复杂的矿化脉体类型及独特的元素分带矿化特征。东昆仑斑岩铜矿床具有斑岩型-浅成低温热液型-矽卡岩型-隐爆角砾岩型为同一成矿系统的鲜

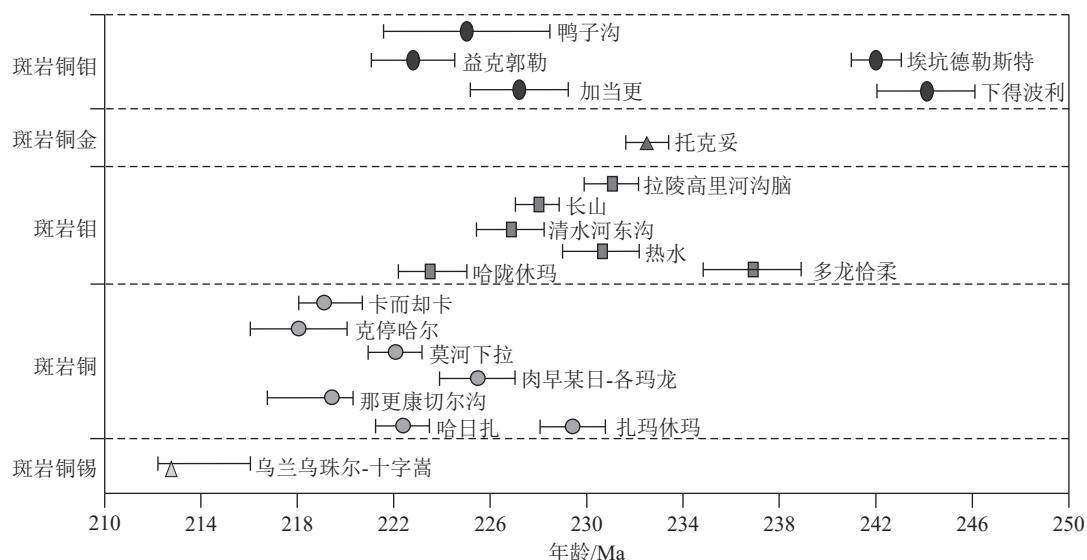


图 2 东昆仑斑岩矿床致矿斑岩年龄分布

Fig. 2 Age distribution chart of porphyry deposit in East Kunlun

表 1 东昆仑斑岩型矿床特征

Table 1 Characteristics of porphyry deposits in East Kunlun

编号	位置	矿床规模	矿化类型	赋矿围岩	围岩蚀变	致矿斑岩/ 含矿脉	成矿年龄	参考文献
1	哈日扎	大型	斑岩Cu 热液脉型Ag、Pb、Zn、Au 矽卡岩型Fe、Cu	凝灰岩、黑云斜长片麻岩、似斑状 二长花岗岩、花岗闪长岩	深部有面型蚀变特征,上部绿帘石化、绿泥 石化,下部高岭石化、绢云母化、底部硅化、 绢云母化	花岗岩	222.5± 1.0 Ma	马忠元等, 2024a
2	那更康切尕沟	超大型	斑岩Cu 热液脉型Ag、Pb	片麻岩、片岩、斜长花岗岩、花岗 闪长岩、似斑状二长花岗岩、 构造角砾岩	无面型蚀变特征,具黄铁矿化、硅化、碳酸 盐化、绢云母化、高岭土化、绿泥石化、绿 帘石化、褐铁矿化、软锰矿化	石英脉 花岗岩	217.6 Ma 219.8± 1.1 Ma	Fan et al., 2021 马忠元等, 2024a
3	哈晓休玛	中型	斑岩Mo 热液脉型Cu	黑云斜长片麻岩、斜长花岗岩、 碎裂状花岗岩	深部有面型蚀变特征,由斑岩体向外依次为 钾化带、硅化带、绢英岩化带和青磐岩化带	花岗闪长斑岩 石英脉	224.68± 0.88 Ma 223.5± 1.3 Ma	鲁海峰等, 2017
4	肉早某日-各 玛龙	中型	斑岩Cu 隐爆角砾岩型Cu 热液脉型Ag、Pb、Zn、Au	二长花岗岩、似斑状花岗闪长岩、英云 闪长岩、花岗闪长岩	深部有面型蚀变特征,由外部向中心依次具 高岭土化带、青磐岩化带、泥化带、黄铁矿 英岩化带、钾化带的蚀变分带特征	花岗岩	225.5± 1.7 Ma	雷延利等, 2024
5	加当根	小型	斑岩Cu-Mo	流纹岩、英安岩、凝灰岩、 花岗闪长岩	有面型蚀变特征,内带为钾化,中带为硅化 和绢云母化,外带为青磐岩化	花岗闪长斑岩	225± 1.5 Ma 227.2± 1.9 Ma	2015
6	热水	小型	斑岩Mo	二长花岗岩、似斑状黑云母 二长花岗岩	无面型蚀变特征,具钾长石化、硅化、绢云 母化及黄铁矿化	石英脉 二长花岗斑岩	228.6± 7.9 Ma 230.9± 1.4 Ma	国显正等, 2016
7	多龙恰柔	小型	斑岩Mo	二长花岗岩、花岗闪长岩	无面型蚀变特征,矿体或矿化带中主要为钾 化-硅化蚀变,矿化带外部主要为绢英岩化- 绿泥石化	石英脉 二长花岗斑岩	235.9± 1.4 Ma 236.8± 1.8 Ma	国显正, 2021 国显正, 2021
8	清水河东沟	小型	斑岩Mo	英云闪长岩、英云闪长斑岩、辉绿玢岩	无面型蚀变特征,具硅化、绿泥石化、绢云 母化、高岭土化	二长花岗斑岩	226.9± 1.3 Ma	本课题组 测试数据
9	益克郭勒	小型	斑岩Cu-Mo	闪长岩、英云闪长岩	深部有面型蚀变特征,由外部向中心依次具 青磐岩化带、硅化-钾化带、黄铁矿化带、 钾化带的蚀变分带特征	二长花岗斑岩	222.9± 1.3 Ma	郑振华等, 2022

续表 1

编号	位置	矿床规模	矿化类型	赋矿围岩	围岩蚀变	致矿斑岩/ 含矿脉	成矿年龄	参考文献
10	托克妥	小型	斑岩Cu-Au	隐爆角砾岩、花岗闪长岩	有面型蚀变特征,从矿体中心向外,依次为硅化带、钾化带、青磐岩化带和次生氧化富集带	二长花岗斑岩 花岗闪长斑岩	232.49± 0.93 Ma 232.6±1.2 Ma	夏锐等, 2014
11	下得波利	小型	斑岩Cu-Mo	中细粒花岗岩、流纹岩	有面型蚀变特征,主要有硅化、钾长石化、绢云母化、高岭土化、石膏化等	花岗斑岩	244.2± 2.1 Ma	刘建楠等, 2012
12	埃坑德勒斯特	小型	斑岩Cu-Mo			花岗斑岩	242± 1.2 Ma	张雪亭, 2017
13	扎玛休玛	小型	斑岩Cu 热液脉型Cu、Pb、Zn	凝灰岩、安山岩、二长花岗岩、正长花岗岩	无面型蚀变特征,具硅化、绿帘石化、云英岩化、高岭土化等	花岗闪长斑岩	229.5± 1.3 Ma	林艳海等, 2021
14	长山	小型	斑岩Mo 热液脉型Fe、Pb、Zn 矽卡岩型Fe、Pb、Zn	似斑状二长花岗岩、碎屑岩、凝灰岩	无面型蚀变特征,具硅化、钾化、绿帘石化、绿帘石化、碳酸盐化、蛇纹石化	二长花岗斑岩	228± 1 Ma	丰成友等, 2010
15	拉陵高里河沟脑	小型	斑岩Mo 矽卡岩型Fe、Cu	正长花岗岩、二长花岗岩	无面型蚀变特征,具钾化、孔雀石化、青磐岩化	花岗闪长斑岩	231.1± 1.2 Ma	刘建楠等, 2023
16	莫河下拉	小型	斑岩Cu 热液脉型Ag、Pb、Zn、Au	花岗斑岩	无面型蚀变特征,硅化、绢英岩化、绢云母化和碳酸盐化	花岗斑岩	222± 1 Ma	许庆林, 2014
17	家琪式	小型	斑岩Mo-Cu 热液脉型Ag、Pb、Zn	花岗闪长岩、二长花岗岩	无面型蚀变特征,钾化、孔雀石化	花岗斑岩		
18	克停哈尔	小型	斑岩Cu 隐爆角砾岩型Pb、Zn	粒花岗闪长岩、闪长岩、蚀变闪长玢岩、二长花岗岩	地表有面型蚀变特征,硅化、褐铁矿化、高岭土化、绿帘石化	花岗闪长斑岩	218± 2 Ma	顾焱, 2019
19	鸭子沟	小型	斑岩Cu-Mo	花岗闪长岩、大理岩	无面型蚀变特征,具透辉石、绿帘绿帘石、矽卡岩化、石榴子石化	钾长花岗斑岩	224.7± 3.4 Ma 224.0± 1.6 Ma	何书跃等, 2009 李世金等, 2008
20	乌兰乌珠尔-十字嵩	大型	斑岩Cu-Sn 热液脉型Ag、Pb、Zn	似斑状二长花岗岩、二长花岗岩	地表有面型蚀变特征,由北北东到西南的总体分带为:硅化带→似千枚岩化带→钾化-黑云母化带→泥化带	花岗斑岩	212.3± 1.8 Ma 215.1± 4.5 Ma	本课题组测试数据 余宏全等, 2007
21	卡而却卡	大型	斑岩Cu 矽卡岩型Cu、Mo、Zn 隐爆角砾岩型Pb、Zn 热液脉型Cu、Pb、Zn、Au	花岗闪长岩、似斑状黑云母二长花岗岩、淮间山群	深部有面型蚀变特征,斑岩为中心向外呈长椭圆状分布,中部为钾硅化带,南侧为黄铁似千枚岩化带	花岗闪长斑岩	219.2± 1.0 Ma	李东生等, 2010

明特点,且浅成低温热液型银铅锌矿往往达到大型—超大型规模(如哈日扎、那更康切尔沟、乌兰乌珠尔-十字嵩等矿床);而斑岩铜矿床往往成矿类型较单一(如清水河东沟、哈陇休玛等矿床)。

冈底斯带和东昆仑带是特提斯成矿域重要的成矿区带,冈底斯成矿带斑岩成矿系统矿产勘查和研究均取得了重大突破,而东昆仑带与冈底斯带具有类似的斑岩成矿构造背景,斑岩及斑岩型矿床均尚未取得重大进展。分析认为,东昆仑地区由于受勘探深度所限,大部分已发现的矿床中,致矿斑岩仅为深部斑岩体顶部或旁侧的斑岩枝脉;而已发现的矿化以斑岩顶、边部的热液脉状银铜铅锌金、矽卡岩型铁铜铅锌、隐爆角砾岩型铅锌银等为主,围岩蚀变类型主要为硅化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、高岭土化、碳酸盐化(国显正, 2021)。深部隐伏斑岩体埋深较大,例如,哈日扎矿床预测隐伏斑岩体埋深达 1200~1600 m(马忠元等, 2023a);各玛龙-肉早某日斑岩型铜矿床针对斑岩体实施的钻孔深 1435.47 m,孔内见多层花岗斑岩和隐爆角砾岩层,圈定铜矿体 47 条,厚 144.48 m, Cu 品位为 0.2%~1.81%,圈定铜矿化体厚 290.15 m;圈定金矿体 8 条,厚 11.24 m, Au 品位为 1.02×10^{-6} ~ 11.32×10^{-6} ;而浅部及地表圈定了受构造带控制的热液脉状银铅锌矿体。益克郭勒斑岩型铜矿床对二长花岗斑岩施工的钻孔 ZK03 深达 909.40 m(王永德和李生虎, 2023),孔内圈定铜矿体累计厚 83.48 m, Mo 平均品位 0.064%;钻孔 ZK001 深达 1502.20 m,圈定 Mo 矿体累计厚 27.90 m, 钼品位 0.03%~0.10%,圈定铜矿体累计厚 28.05 m, Cu 品位 0.10%~0.31%。深部斑岩中矿化以星点状、稀疏浸染状、浸染状、团块状、不规则粒状的黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿为主,少量方铅矿、闪锌矿、黝锡矿等。与斑岩矿有关的青磐岩化、泥化、硅化、黄铁绢英岩化、钾化等面型蚀变往往出现在钻孔深部,说明东昆仑斑岩成矿系统保存条件良好,较典型的蚀变特征依次为外部的绿泥石化、绿帘石化带,中部的高岭石化、黄铁绢英岩化,底部的黄铁矿化、绢英岩化、硅化、钾化带,核部的钾化、硅化等分带特征。随着勘探深度的增加,东昆仑造山带会取得斑岩矿床勘查新突破。

2.5 矿床类型

斑岩型矿床通常按有用金属元素的含量进行分类,包括斑岩型铜、钼、金、钨、锡矿床,最常见和最

有经济价值的是斑岩型铜和斑岩型钼矿床。在实际中,往往存在过渡型矿,如斑岩型铜-钼、斑岩型铜-金等,但钼和金之间的过渡型矿很少见(Seedorff et al., 2005),斑岩型铜-锡矿除在中国湘南(李雪凯等, 2013)、广东(古润平等, 2009)等地区之外鲜有报道,东昆仑造山带目前仅在祁漫塔格乌兰乌珠尔地区发现一处斑岩型铜-锡矿。

东昆仑造山带已发现的斑岩成矿系统不同类型的矿产与致矿斑岩体密切相关,均围绕斑岩体及其顶、边部或附近区域产出,致矿斑岩侵入活动提供了成矿流体和成矿物质。对已发现的 21 处斑岩矿床根据斑岩中主要金属元素含量划分为 5 种矿床类型,即斑岩型铜矿床 6 处,以哈日扎矿床、那更康切尔沟矿床、莫河下拉矿床、扎玛休玛矿床、克停哈尔矿床、卡而却卡矿床为代表;斑岩型钼矿床 6 处,以长山矿床、益克郭勒矿床、哈陇休玛矿床、清水河东沟矿床、拉陵高里河沟脑矿床、热水矿床为代表;斑岩型铜钼矿床 7 处,以埃坑德勒斯特矿床、下得波利矿床、鸭子沟矿床、多龙恰柔矿床、加当根矿床、各玛龙矿床、家琪式矿床为代表;斑岩型铜金矿床 1 处,以托克妥矿床为代表;斑岩型铜锡矿床 1 处,以乌兰乌珠尔-十字嵩矿床为代表。

在斑岩铜、斑岩铜钼、斑岩铜锡矿床中斑岩体(脉)边部往往发育热液脉型银多金属矿(如哈日扎、那更康切尔沟、乌兰乌珠尔-十字嵩、肉早某日-各玛龙等矿床)(张爱奎等, 2023),隐爆角砾岩型铅锌矿(如卡而却卡、克停哈尔等矿床)和矽卡岩型多金属矿(如卡而却卡、哈日扎-胜利铁矿等矿床),形成矿床组合,不同成矿类型均与致矿斑岩岩浆侵入有着成因联系。

3 典型矿床

3.1 哈日扎斑岩型铜矿

哈日扎斑岩型铜矿位于东昆仑东段,夹持于昆北和昆中断裂之间,区内围岩主要为古元古界金水口岩群片麻岩段、片岩段、大理岩段,上三叠统鄂拉山组陆相火山岩组,以及三叠纪花岗闪长岩、似斑状二长花岗岩等(马忠元等, 2023a)。控矿构造以北西向断层为主,围绕主干断裂发育近东西向、近南北向、北东向 4 组次级构造,具相互交切,错综复杂的特点(图 3-a)。矿体受断裂构造控制明显,主要沿北西向主干断裂和次级断裂带产出,对围岩不具有选择性。

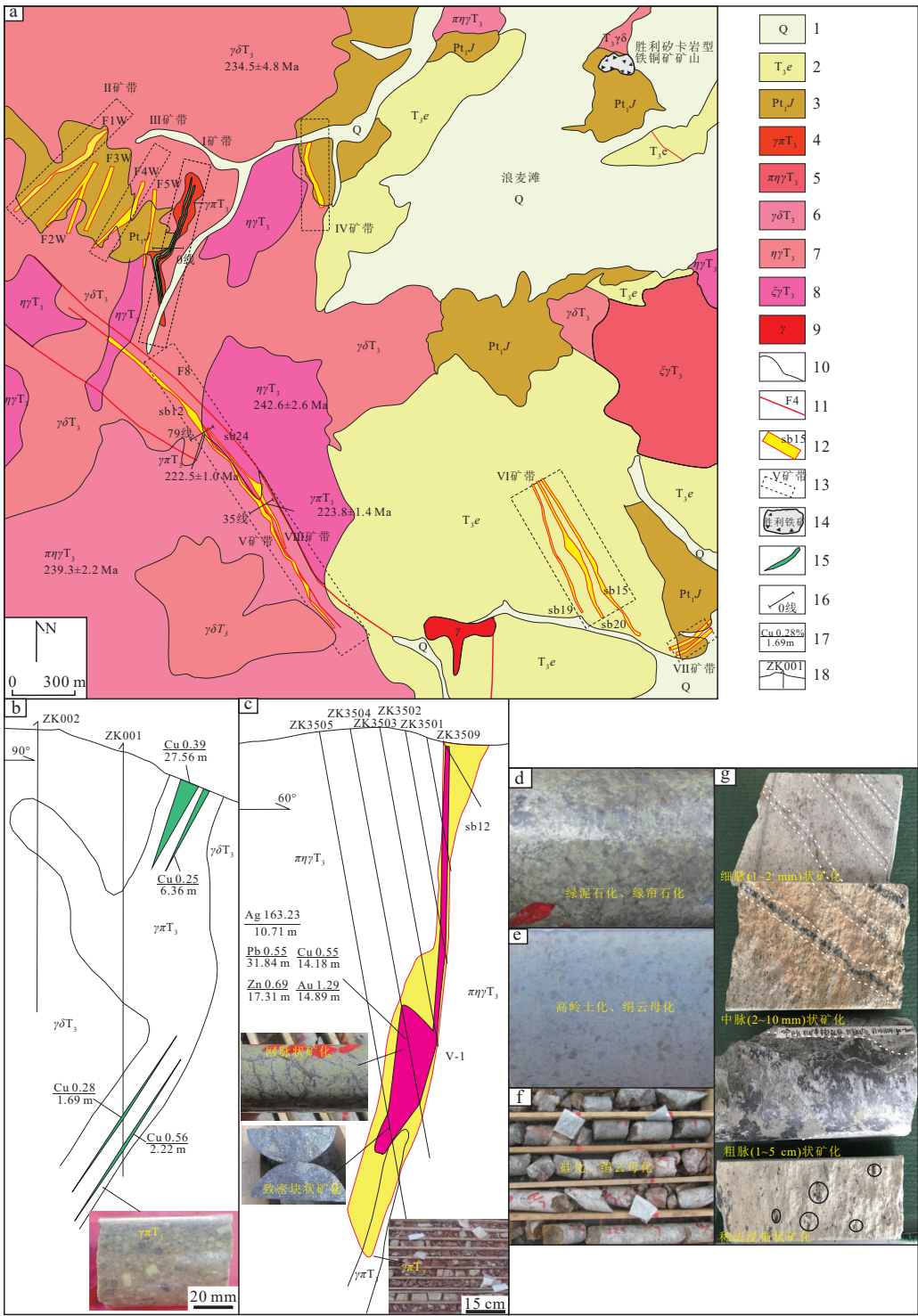


图 3 哈日扎斑岩型铜矿(据马忠元等, 2023a 修改)

Fig. 3 Porphyry copper mine in Harizha

a—哈日扎斑岩铜矿床地质图; b—I 矿带 0 勘探线剖面(见含铜花岗岩斑岩); c—V 矿带 35 勘探线剖面(见不规则网脉状、致密团块状矿化和底部花岗岩斑岩枝); d—绿帘石化、绿泥石化蚀变; e—高岭石化、绢云母化蚀变; f—硅化、绢云母化蚀变; g—由浅及深, 脉状矿转变为稀疏浸染状矿化。
1—第四系; 2—上三叠统鄂拉山组; 3—古元古界金水口岩群; 4—晚三叠世花岗岩斑岩; 5—晚三叠世似斑状二长花岗岩; 6—晚三叠世花岗闪长岩; 7—晚三叠世二长花岗岩; 8—晚三叠世正长花岗岩; 9—花岗岩脉; 10—地质界线; 11—断层位置及编号; 12—构造蚀变带位置及编号; 13—矿带位置及编号; 14—胜利铁矿采坑; 15—铜矿体; 16—剖面位置及编号; 17—品位与厚度; 18—钻孔剖面位置及编号

区内致矿花岗斑岩多以岩脉形式产出,已发现的矿体有斑岩岩枝中的铜矿体(图 3-b)、斑岩岩枝顶部和旁侧发育的构造破碎带中的热液脉型银铜铅锌金矿体(图 3-c)、斑岩岩枝外围与金水口岩群大理岩层接触部位的矽卡岩型铁铜铅锌金矿体等。其中,以热液脉型银多金属矿体为主,多呈似层状、脉状、条带状、透镜状等,矿体长 50~976 m(V-1 主矿体长 3200 m);延深 5~479 m,矿体厚 1.08~6.95 m,单工程最大厚度为 53.07 m;矿体中 Cu 品位 0.23%~0.81%, Pb 品位 0.31%~1.27%, Zn 品位 0.52%~1.23%, Ag 品位 42.95×10^{-6} ~ 105.33×10^{-6} 。矿化以充填成矿为主,矿化的富集程度与岩石中裂隙发育及各类硅质脉体(石英脉)充填的密集程度、脉宽等有关。

矿石中金属矿物复杂,主要有黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、毒砂、白铁矿、辉银矿等,非金属矿物主要有斜长石、石英、钾长石、角闪石、黑云母、绢云母、方解石等。围岩蚀变包括高岭土化、硅化、绿泥石化、绢云母化、绿帘石化、碳酸盐化等。但在

VI 矿带深部由浅到深依次出现绿帘石化、绿泥石化(图 3-d)→高岭石化、绢云母化(图 3-e)→强硅化、绢云母化的蚀变分带特征(图 3-f),成矿呈浅部热液脉状银铜铅矿,深部出现黄铜矿及稀疏浸染状方铅矿化的特征(图 3-g);这些成矿特点和蚀变特征均指示矿化由热液脉型转变为斑岩型。对 V 矿带 79、35 勘探线钻孔深部揭露的花岗斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得致矿斑岩的年龄为 223.8~222.5 Ma(马忠元等,2024a)。

3.2 清水河东沟斑岩型钼矿

清水河东沟斑岩型钼矿位于东昆仑中东段,夹持于昆北和昆中断裂之间。矿区第四系广布,构造不甚发育,中酸性侵入岩广泛发育,主要为三叠纪花岗闪长岩、二长花岗斑岩、英云闪长岩、闪长玢岩脉(图 4-a)。致矿岩体花岗闪长斑岩主要分布在中南部,地表形态呈椭圆状、不规则状,深部形态产状较平缓,与围岩花岗闪长岩接触界线清晰(图 4-c)。

矿区圈定的钼矿体主要产于花岗闪长斑岩中,

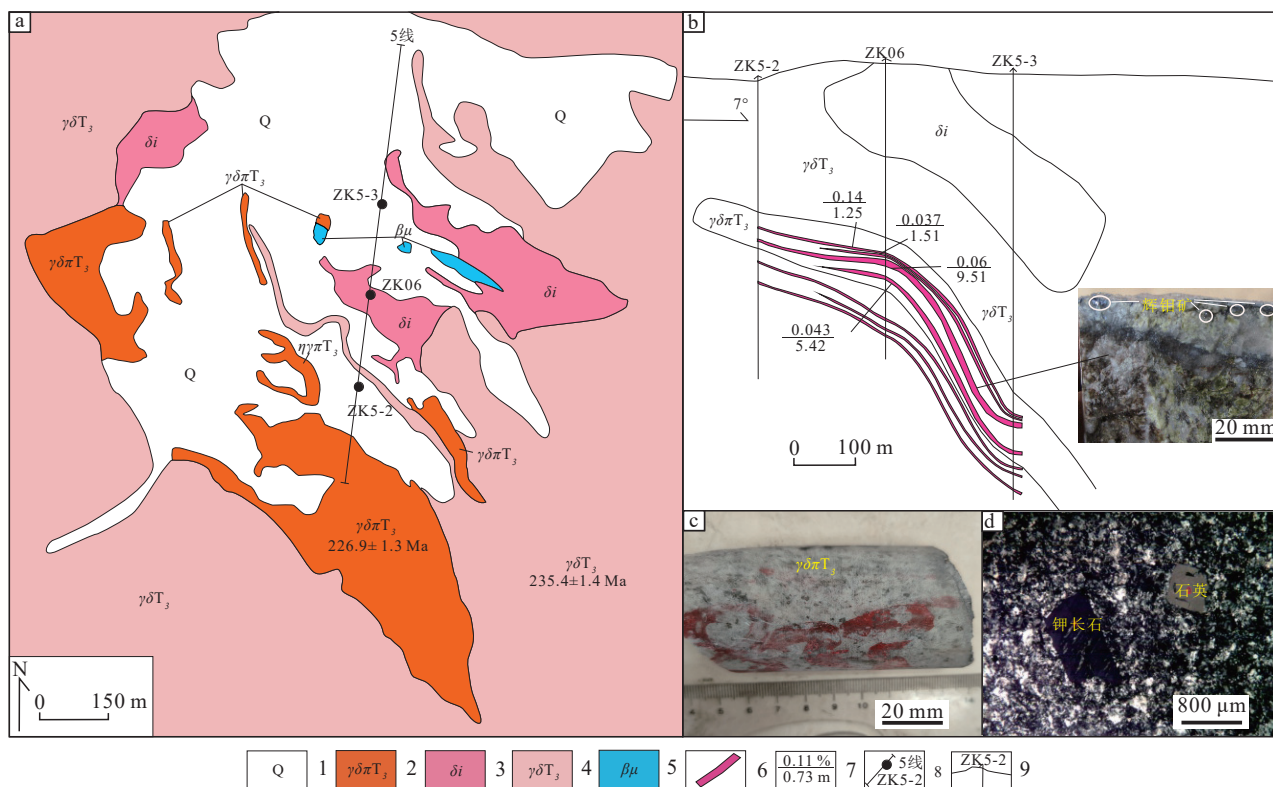


图 4 清水河东沟斑岩型钼矿(据马忠元等,2024d)

Fig. 4 Porphyry molybdenum ore in Qingshuihedonggou

a—清水河东沟钼矿床地质图;b—5 勘探线剖面图(浸染状辉钼矿);c—二长花岗斑岩;d—斑岩显微镜下特征。1—第四系;2—晚三叠世二长花岗斑岩;3—英云闪长岩;4—晚三叠世花岗闪长岩;5—辉绿玢岩脉;6—钼矿体;7—品位与厚度;8—勘探线编号和钻孔编号;9—钻孔剖面位置及编号

多呈层状、似层状(图4-b)、透镜状,形态较简单,长一般为200 m,厚1.00~5.28 m,Mo平均品位为0.03%~1.34%。

矿石中的金属矿物以辉钼矿、黄铁矿为主,辉钼矿多呈亮灰色鳞片集合体状、浸染状(图4-d)、星点状分布在后期穿插充填的石英脉体及岩石裂隙面。非金属矿物主要为石英、钾长石、斜长石等。围岩蚀变主要为钾化、绢云母化、硅化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化等。ZK5-3 钻孔深部揭露的致矿花岗闪长斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 226.9 ± 1.3 Ma(未发表数据)。

3.3 埃坑德勒斯特斑岩型铜钼矿

埃坑德勒斯特斑岩型铜钼矿位于东昆仑中段,夹持于昆中和昆南断裂之间。矿区第四系广布,中酸性侵入岩广泛发育,主要为中二叠世二长花岗岩(岩基状)、早三叠世闪长岩和花岗岩(岩株状)。致矿斑岩为中三叠世花岗斑岩,呈岩株、岩脉群状(图5-d,e),斑岩顶部发育隐爆角砾岩(图5-c),岩

石中角砾成分复杂,磨圆、大小不一,胶结物由长英质隐晶质组成,其内可见方铅矿化。花岗斑岩脉南、北两侧发育2条近东西向的断层,地表围绕斑岩及断层发育面型蚀变(图5-a),主要表现为粘土化、硅化、绢云母化蚀变及充填的碳酸盐脉。

矿区铜矿体、钼矿体、铜钼矿体呈脉状、似层状(图5-b),长60~621 m,厚一般为1.30~7.53 m,Mo品位0.035%~0.090%,Cu品位0.21%~0.89%。

矿化岩石具硅化、黄铁矿化、高岭土化、绢云母化、绿泥石化蚀变。矿石中的金属矿物以辉钼矿、黄铜矿(图5-f)为主,局部偶见斑铜矿、辉铜矿、铜蓝等;非金属矿物主要为石英、斜长石、绢云母、白云母、角闪石、绿帘石、绿泥石等。前人对花岗斑岩获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 248.3~242 Ma(刘建楠等,2012;张雪亭等,2017)。

3.4 乌兰乌珠尔-十字嵩斑岩型铜锡矿

乌兰乌珠尔-十字嵩斑岩型铜锡矿床位于东昆仑西段昆中断裂南北支中间乌兰乌珠尔主峰一带,夹

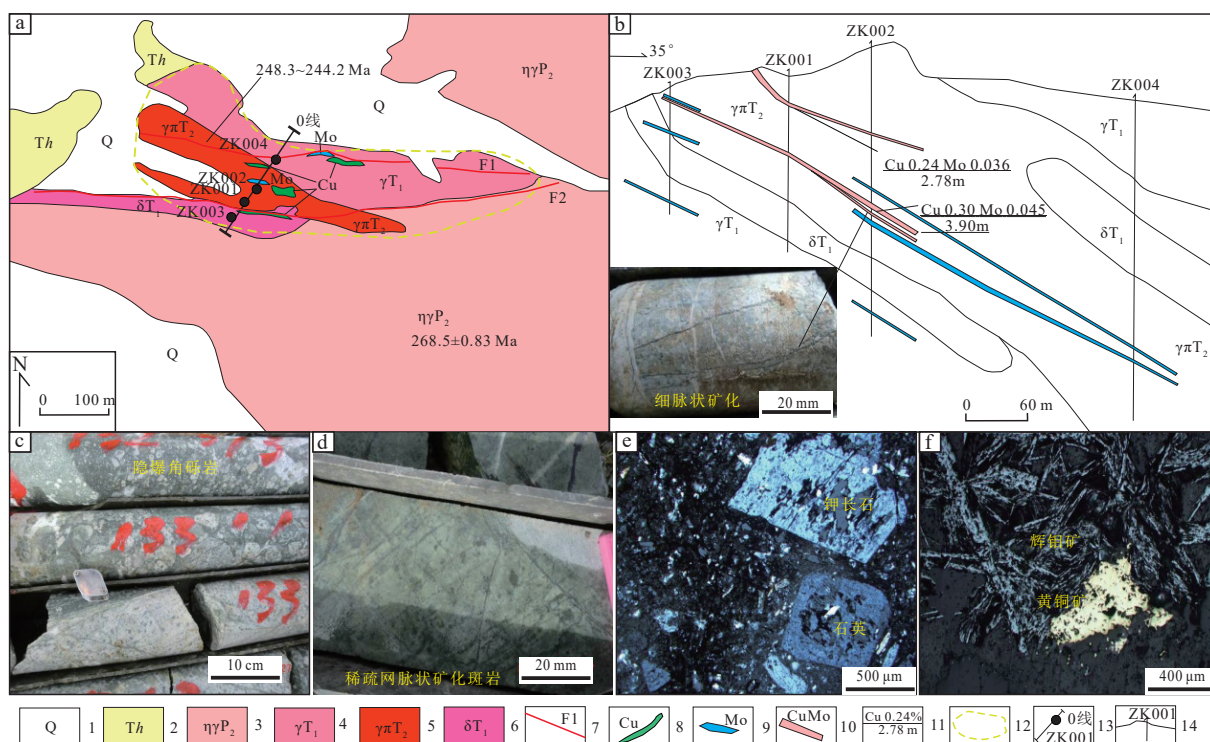


图5 埃坑德勒斯特斑岩型铜钼矿(据湛守智等,2013 修改)

Fig. 5 Porphyry copper and molybdenum ore in Aikengdelesite

a—埃坑德勒斯特铜钼矿床地质图;b—铜钼矿0勘探线剖面图(含矿化照片);c—隐爆角砾岩;d—含矿花岗岩;e—显微镜下花岗岩;f—放射状辉钼矿和不规则状黄铜矿。1—第四系;2—三叠系洪水川组;3—中二叠世二长花岗岩;4—早三叠世花岗岩;5—中三叠世花岗岩;6—早三叠世闪长岩;7—断层;8—铜矿体;9—钼矿体;10—铜钼矿体;11—品位与厚度;12—面型蚀变范围;13—勘探线编号和钻孔编号;14—钻孔剖面位置及编号

持于莲花石-小狼牙山南缘断裂和阿达滩-乌兰乌珠尔南缘断裂之间。矿区第四系不发育,大面积出露泥盆纪中粗粒似斑状二长花岗岩、中细粒二长花岗岩。控矿构造为北西向、北东东向及近东西向断裂(图 6-a),其中北西向、北东东向主干断裂活动时间长,二者复合相交部位发育宽大的蚀变破碎带,长约 6 km,最宽处可达 150~450 m,走向上呈膨大尖缩,沿破碎蚀变带见 2 条含铜锡花岗斑岩脉,连续性好,长达 2400 m,宽一般 5~10 m,最宽达 30 m,围岩斑状二长花岗岩韧性变形特征明显,花岗斑岩中未见变形迹象,但蚀变较强烈且具分带性,呈钾化、硅化带→绢云母化、高岭石化带→绿泥石化、绿帘石化带分布,其中,黄铜矿在钾化和绢云母化带中最富集。

花岗斑岩脉中圈定 18 条铜矿体,13 条锡矿体,铜矿体长 121~822 m,厚 1.00~39.23 m,Cu 品位 0.23%~2.70%;锡矿体长 90~418 m,厚 1.10~7.47 m,Sn 品位 0.23%~2.70%。黄铜矿多呈稀疏浸染状、不规则细脉状等(图 6-b),锡矿多呈不规则星点状。花岗斑岩脉南西侧发现了规模巨大的浅成低温热液脉型银多金属矿带,圈定 15 条银铅锌矿体,矿体多呈似层状、脉状(图 6-c),长 140~2048 m,延深 80~420 m,平均厚 1.17~3.24 m,其中 Ag 品位 46.54×10^{-6} ~ 2790.17×10^{-6} ,Pb 品位 0.77%~9.12%,Zn 品位 0.54%~4.42%,顶、底板围岩主要为似斑状二长花岗岩,银铅锌矿化主要沿岩石裂隙呈不规则细脉状、网脉状、不规则团块状产出(图 6-c)。

斑岩矿石中金属矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、锡石、黝锡矿等,热液脉状银铅锌矿石中金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、辉银矿等。含铜锡斑岩脉地表具面型蚀变,从北东到南西具有硅化带→似千枚岩化带→钾化-黑云母化带→泥化带的蚀变分带特征(胡永达,2007),热液脉状矿体自上而下亦具有上部绿帘石化、绿泥石化层,中部高岭石化、绢云母化层,以及底部硅化、绢云母化层(含矿)的蚀变特征(图 6-d)。

在乌兰乌珠尔致矿花岗斑岩中获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 212.9 ± 2.0 Ma,LA-ICP-MS 锡石 U-Pb 同位素年龄为 212.3 ± 1.8 Ma,围岩似斑状二长花岗岩获得的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 406.7 ± 1.8 Ma,二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄为 408.5 ± 2.1 Ma(未发表数据)。

3.5 托克妥斑岩型铜金矿

托克妥斑岩型铜金矿位于东昆仑中东段,紧邻昆中断裂北侧。矿区第四系不甚发育,仅见古元古界金水口岩群片麻岩段地层,区内大面积分布中细粒花岗闪长岩,岩体中发育北西向展布的逆断层,地层、构造、岩浆岩与成矿无关,区内发育一隐爆角砾岩筒(图 7-a, c),地表呈椭圆形,环形构造发育,且伴有放射状张性裂隙,在剖面上表现为喇叭状,随着深度增加而尖灭。角砾为次圆状、圆状及少量的棱角状。砾径一般为 10~30 cm,最大 80~100 cm,最小 2~3 mm,角砾成分较复杂,以花岗质(深蚀变英云闪长岩)岩石为主,另有长英质、白云岩、黄铁矿、黄铜矿团块等。胶结物以花岗质岩石的岩粉、碎屑为主,在热液蚀变作用下形成高岭土硅化、沸石化、铁碳酸盐等(郑建华和东寿山,2014)。

角砾岩筒地表具面型蚀变,自矿体中心向外,依次为硅化带、钾化带、青磐岩化带和次生氧化富集带,其内可见黄铜矿化(图 7-b、d)、黄铁矿化(图 7-e)、方铅矿化等。角砾岩筒底部为花岗斑体(距地表 298 m 处),花岗斑岩中见有明显的黄铜矿化。

隐爆角砾岩及花岗斑岩中共圈出铜矿体 8 条,铜金矿体 2 条,铜银矿体 1 条。铜矿体长 80~370 m,厚 1.29~12.03 m,Cu 品位为 0.28%~1.04%,铜矿体中普遍具有金矿化,伴生 Au 品位 0.22%~0.77%。铜金矿体长均为 80 m,厚分别为 2.24 m 和 2.88 m,Cu 品位分别为 0.39% 和 0.83%,Au 品位分别为 1.01×10^{-6} 和 4.73×10^{-6} ;铜银矿体长 50 m,厚 1.15 m,Cu 品位为 2.83%,Ag 品位为 105.50×10^{-6} 。

矿石中金属矿物主要为黄铁矿和黄铜矿,偶见方铅矿和闪锌矿,非金属矿物有石英、长石、绢云母、粘土矿物及少量的方解石。前人对区内斑岩获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 232.49~232.6 Ma(夏锐等,2014)。

4 构造-岩浆演化与成矿作用过程

随着古特提斯洋的演化,洋壳俯冲引发了幔源岩浆与壳源岩浆的混合,一系列板片断离、岩石圈拆沉、软流圈物质上涌、岩石圈地幔部分熔融、上下地壳部分熔融等地质作用和与岩浆侵位、热液流体等相关的金属超常富集成矿作用发生。

根据古特提斯洋演化历程,在 332.8 Ma 左右古特提斯洋洋壳形成(刘战庆,2011),于早石炭世古特

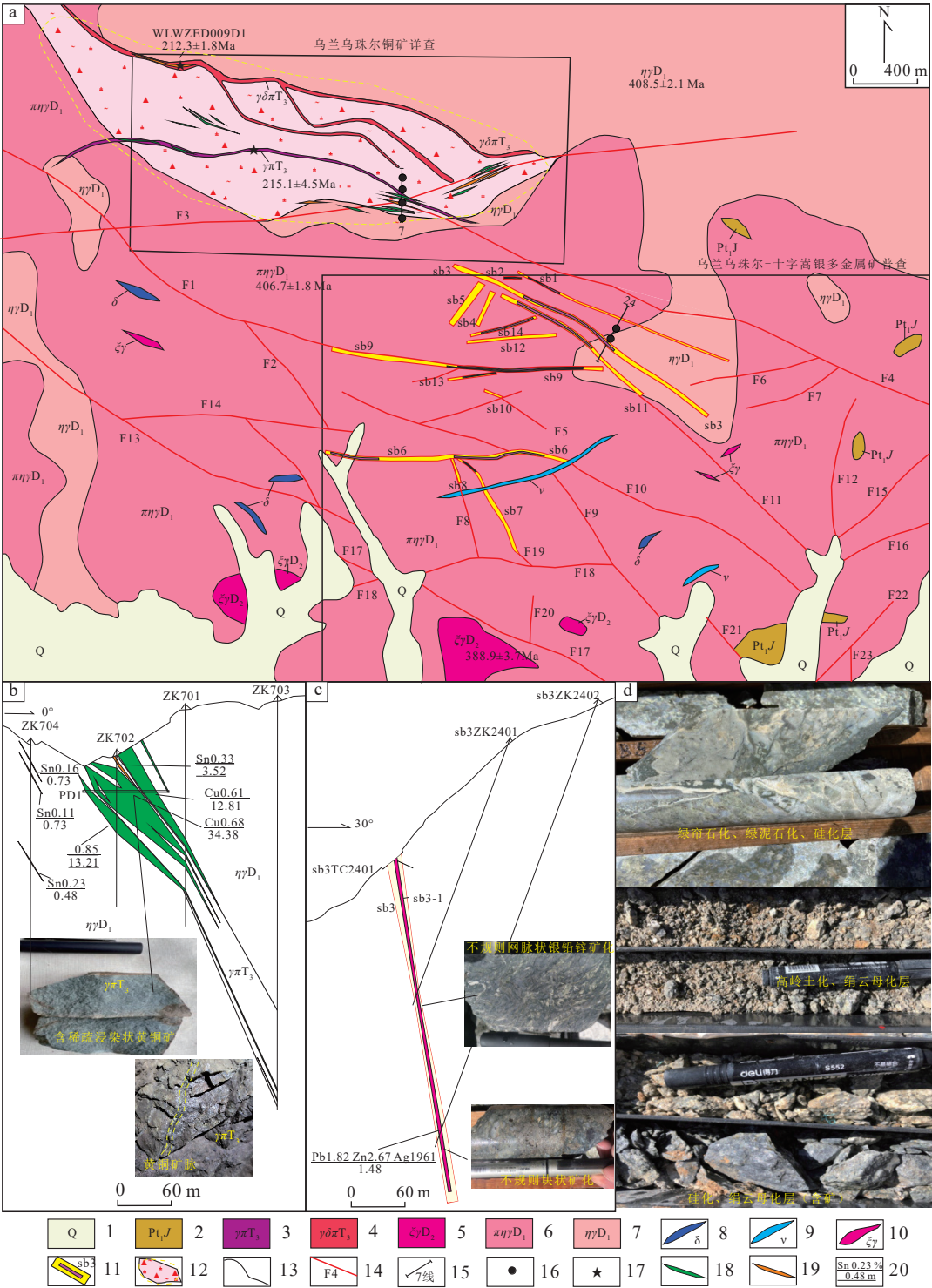


图 6 乌兰乌珠尔-十字嵩斑岩型铜锡矿(据马忠元等, 2024a 修改)

Fig. 6 Porphyry copper tin ore in Wulanwuzhuier-Shizisong

a—乌兰乌珠尔-十字嵩铜锡矿床地质图; b—斑岩铜锡矿 7 勘探线剖面图; c—热液脉状银铅锌矿 24 勘探线剖面图; d—花岗斑岩中浸染状黄铜矿; e—不规则细脉状银铅锌矿化。1—第四系; 2—古元古界金水口岩群; 3—晚三叠世花岗斑岩; 4—晚三叠世花岗闪长斑岩; 5—中泥盆世正长花岗岩; 6—早泥盆世似斑状二长花岗岩; 7—早泥盆世二长花岗岩; 8—闪长岩脉; 9—辉长岩脉; 10—正长花岗岩脉; 11—含矿构造蚀变带位置及编号; 12—高岭土化绿泥石化面状蚀变破碎带; 13—地质界线; 14—断层位置及编号; 15—勘探线剖面位置及编号; 16—钻孔; 17—测年样品位置; 18—铜矿体; 19—锡矿体; 20—品位与厚度

提斯洋逐渐开启,晚石炭世古特提斯洋壳不断扩张(Yue et al., 2022),在 278 Ma 左右古特提斯洋开始闭合(Xiong et al., 2014),中二叠世后古特提斯洋壳俯冲于东昆仑地块之下(Li et al., 2022; 图 8),东昆仑南部布青山-阿尼玛卿俯冲增生楔代表了古特提斯大洋消失的残迹(刘战庆, 2011),持续的洋壳俯冲使昆中断裂发生走滑,同时为深部玄武质岩浆底侵作用提供了上升通道,形成晚二叠世一早三叠世镁铁质岩墙群(国显正, 2021)。

中三叠世时俯冲作用结束(Chen et al., 2017),俯冲板片流体促使基性下地壳和富集地幔部分熔融,部分熔融形成的岩浆底侵古老地壳,形成新生下地壳。该阶段在阿尼玛卿洋沿昆南断裂向北俯冲的活动大陆边缘环境形成了含铜钼斑岩体,埃坑德勒斯特-下得波利含铜-钼斑岩与其他斑岩属高钾钙碱性岩系列相比,具有更亏损的 Nb、Ta、Zr、Hf、Sm 和低的 Sr/Y、Sr/Yb 值,暗示其具有弧岩浆的特点。

243~238 Ma 是俯冲环境向同碰撞环境转换的阶段(Xia et al., 2017),在即将转入同碰撞阶段时,发生了大规模的幔源岩浆底侵作用。

随后进入巴颜喀拉地体与东昆仑地体持续碰撞造山陆壳增厚过程,即同碰撞阶段。在同碰撞造山早期,随着俯冲板片断离/撕裂,地幔岩石圈由于重力不稳定引起软流圈地幔上涌,诱发早期遭受俯冲板片流体/熔体交代改造过的富集地幔局部熔融,熔体与地幔橄榄岩发生相互作用,地震剖面反映东昆仑地区莫霍面(约 50 km)明显高于沱沱河地区(约 73 km),表明东昆仑造山带存在软流圈上涌(张爱奎等, 2023)。俯冲晚期与同碰撞阶段,东昆仑造山带还形成了五龙沟、阿斯哈、果洛龙洼、巴隆、大场、满丈岗等与壳幔岩浆混合作用有关的金矿床(何书跃等, 2023)。

在 230 Ma 左右,进入同碰撞和后碰撞转换阶段,晚三叠世中晚期,由于加厚下地壳的存在,地球动力平衡造成岩石圈不断拆沉,东昆仑造山带垮塌,进入弧后伸展环境(马忠元等, 2024a)。岩石圈拆沉引起软流圈地幔上涌,底侵的幔源岩浆将大量成矿物质带入地壳(Zhang et al., 2017a),致使被流体交代发生富集作用的新生下地壳重熔,熔体在地壳经历了强烈的结晶分异,最终形成一系列中—酸性花岗质侵入岩(埃达克质花岗岩),是诱发斑岩矿床成矿的主要因素。

岩浆上侵为成矿物质活化迁移富集提供了热动力,同时导致地壳压力降低形成不同方向的次级断

裂,还通过断层滑动和角砾岩化作用不断创造新的渗透空间,使热液活动能够长时间持续进行,并形成多阶段的矿化作用。浅成热液对早期形成的斑岩型矿床起到了一定的改造和富集作用(Catherine et al., 2024)。该阶段主要在东昆中构造带形成了含铜、钼、铜钼、铜金斑岩体,挤压环境向伸展环境的转变为斑岩型矿床提供了非常有利的构造条件(王瑞等, 2020),主要成矿元素为 Cu、Mo、Sn、Ag、Pb、Zn、Au、Fe 等。该时期还在东昆仑东段发现大量源自于岩石圈地幔的基性岩墙群(A 型花岗岩)(约 226 Ma)(封铿等, 2022),在东昆仑西段发育数量较多的辉绿岩脉(墙)(约 227.5 Ma)(钟世华等, 2017),均指示晚三叠世中晚期后碰撞阶段的特征。

进入到燕山期—新特提斯洋演化阶段,东昆仑中东段主要经历了 160~90 Ma 和 20 Ma 至今 2 个快速冷却阶段,冷却速率分别为 1.67°C/Ma 和 2.25°C/Ma(郝娜娜, 2016)。东昆仑西段主要经历了 140~110 Ma, 110~25 Ma 和 25 Ma 至今 3 个快速冷却阶段,冷却速率分别为 0.78°C/Ma、1.27°C/Ma 和 1.67°C/Ma(尚未发表数据)。整个东昆仑地区隆升速率为 0.041~0.106 mm/a,平均剥蚀速率为 0.027~0.22 mm/a,处于持续向上抬升的状态。

5 成矿模式

综合梳理东昆仑斑岩矿床发现,矿床类型以斑岩型、热液脉型为主,部分矿床中还发育矽卡岩型和隐爆角砾岩型,成矿体系多为斑岩型-矽卡岩型-隐爆角砾岩型-浅成低温热液脉型组成的叠加复合成矿系统。不同类型的矿床形成均与斑岩侵入活动密切相关,它们是同一成矿作用的产物,具有相同的成因。在致矿斑岩体及其与围岩接触部位,常见浸染状、星点状矿化,沿侵入体与碳酸盐岩接触带形成的矽卡岩带产出矽卡岩型矿体,多呈似层状、长条带状、月牙状产出。致矿斑岩顶部或边部发育的隐爆角砾岩筒中部及围岩中产出有隐爆角砾岩型矿体,该矿体在隐爆角砾岩筒中呈筒状,隐爆角砾岩筒边部及围岩中呈脉状、树枝状产出。致矿斑岩顶部及边部区域,受区域性深大断裂影响形成一系列北西向、北西西向、北东向、近东西向、近南北向等次级构造(马忠元等, 2024c),在次级构造中产出浅成低温热液脉型矿体,多呈脉状、条带状、透镜状,浅成低温热液脉型矿体因对围岩无选择性而赋矿层位不统一(图 9)。

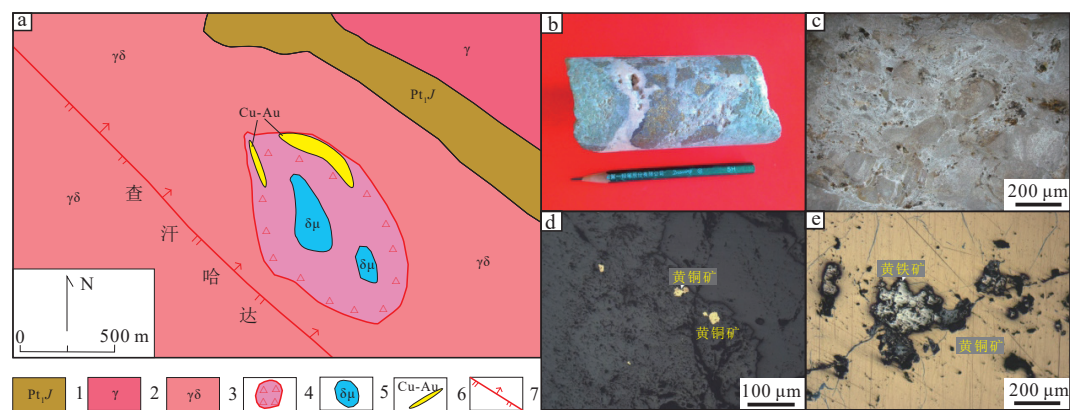


图 7 托克妥斑岩型铜-金矿(据郑建华和东寿山, 2014 修改)

Fig. 7 Porphyry copper-gold mine in Tuoketuo

a—托克妥斑岩铜金矿床地质图; b—黄铜矿化隐爆角砾岩; c—隐爆角砾岩镜下特征; d—浸染状黄铜矿; e—黄铜矿包裹黄铁矿。1—古元古界金水口岩群; 2—花岗岩; 3—花岗闪长岩; 4—隐爆角砾岩筒; 5—闪长玢岩脉; 6—铜金矿体; 7—逆断层

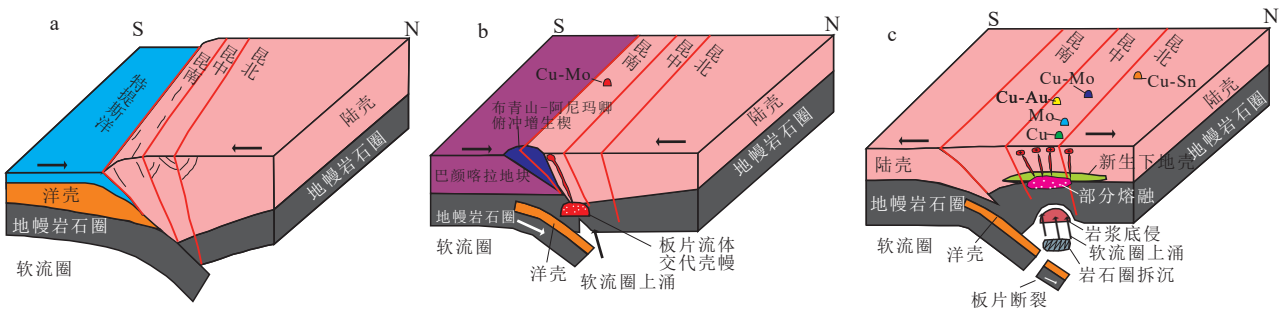


图 8 东昆仑古特提斯斑岩型矿床成矿动力学模型图

Fig. 8 Metallogenetic dynamics model of East Kunlun Paleotethys porphyry deposit

a—洋壳俯冲阶段; b—俯冲-同碰撞阶段; c—同碰撞-后碰撞阶段

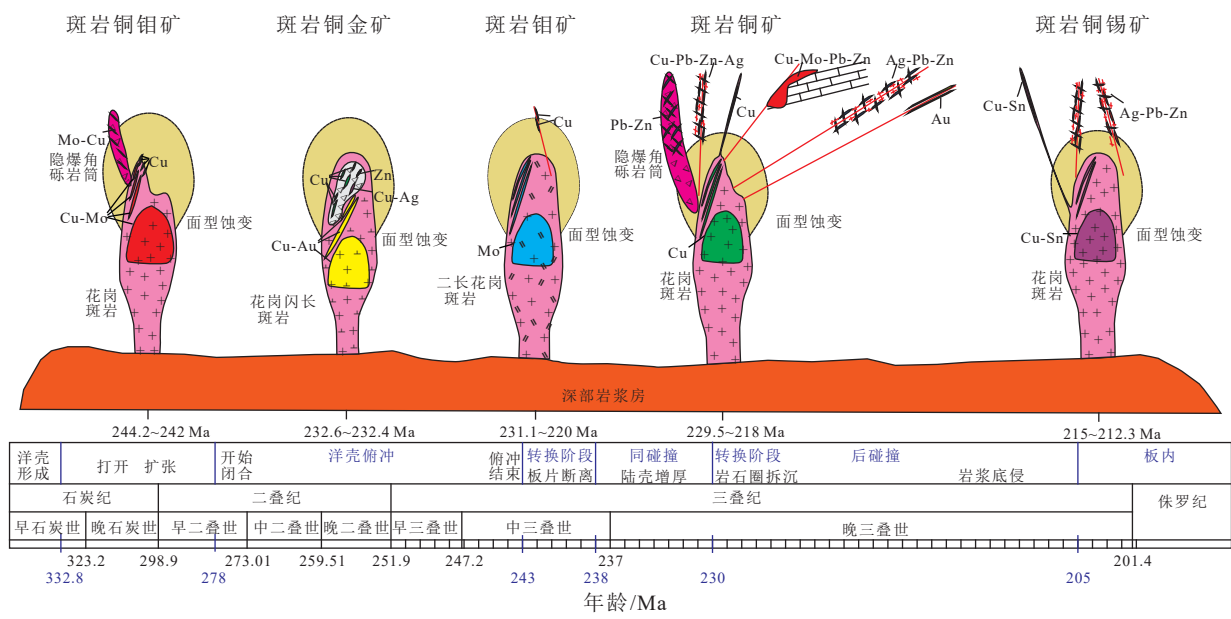


图 9 东昆仑古特提斯构造演化机制与三叠纪斑岩型矿床成矿响应

Fig. 9 Evolution mechanism of East Kunlun Paleotethys structure and metallogenetic response of Triassic porphyry deposits

东昆仑造山带古特提斯俯冲背景下形成的高钾钙碱性弧岩浆,主要形成斑岩铜钼矿床。碰撞背景下发生大规模逆冲作用,主要形成 S 型花岗岩(陆壳重熔),主要生成斑岩钼矿。后碰撞伸展背景下发育大型走滑断裂,俯冲板片断离/撕裂、岩石圈拆沉等深部过程引发的幔源岩浆上涌,以及被流体交代发生富集作用的新生下地壳重熔形成埃达克质岩(王瑞等, 2020),生成斑岩铜、斑岩铜钼、斑岩铜金、斑岩铜锡和与岩浆-热液相关的铁铜银铅锌等矿床。

斑岩铜矿相关的岩体中 Cr、Ni 含量多大于斑岩钼矿岩体,表明斑岩铜矿岩体比斑岩钼矿岩体源区有更多的幔源物质贡献(国显正, 2021)。斑岩铜矿相关的岩体多形成斑岩型铜矿、斑岩铜钼矿、斑岩铜金矿、斑岩铜锡矿、矽卡岩型铁铜铅锌矿、隐爆角砾岩型铅锌银矿、浅成低温热液脉型银铅锌矿等多种矿体类型,斑岩钼矿相关的岩体多形成斑岩钼矿和热液脉型铜矿类型。

6 结 论

(1) 东昆仑致矿斑岩主要为花岗斑岩、花岗闪长斑岩和二长花岗斑岩,其次为石英斑岩和流纹斑岩;成岩时代集中在 236~218 Ma 之间,主要分布于造山带东、西两端,大多数斑岩处于昆北岩浆弧和昆中岩浆弧。

(2) 东昆仑主要有斑岩型铜矿、斑岩型钼矿、斑岩型铜钼矿、斑岩型铜金矿及斑岩型铜锡矿 5 种斑岩矿床类型,在斑岩型铜、铜钼、铜锡矿床中,斑岩体(脉)顶部和边部往往发育热液脉型银多金属矿、隐爆角砾岩型铅锌矿和矽卡岩型多金属矿;斑岩型钼、铜金矿床成矿类型较单一。

(3) 构造为最主要的控矿因素,区域性深大断裂构造为致矿斑岩岩浆侵入提供了空间,由深大断裂牵引形成的一系列次级断裂构造和张性节理裂隙是良好的容矿空间,浅成低温热液脉型银铅锌矿对围岩不具选择性,往往达到大型—超大型规模。

(4) 同碰撞造山早期俯冲板片断离/撕裂引起软流圈地幔上涌,诱发富集地幔的局部熔融和后碰撞伸展阶段岩石圈拆沉等引起软流圈地幔上涌,底侵的幔源岩浆将大量成矿物质带入地壳,使被流体交代发生富集作用的新生下地壳重熔,是诱发东昆仑地区斑岩矿床成矿最主要的动力学背景。

(5) 建立了东昆仑造山带古特提斯时期与中酸性斑岩岩浆侵入相关的斑岩型-矽卡岩型-隐爆角砾岩

型-浅成低温热液脉型成矿系统的综合成矿模式。

References

- Cook DR, Hollings D, Walshe J L. 2005. Giant porphyry deposits: characteristics, distribution, and tectonic controls[J]. *Economic Geology*, 100(5): 801–818.
- Chen J J, Wei J H, Fu L B, et al. 2017. Multiple sources of the Early Mesozoic Gouli batholith, Eastern Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau: Linking continental crustal growth with oceanic subduction[J]. *Lithos*, 292/293: 161–178.
- Catherine M M, Dawn A K, Tony B, et al. 2024. Tracking the porphyry–epithermal mineralization transition using U–Pb carbonate dating[J]. *Geology*, 52(9): 723–728.
- Chen H W, Luo Z H, Mo X X, et al. 2005. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 32(3): 386–395(in Chinese with English abstract).
- Cai H J, Zhang J M, Zhang Q L. 2016. Age and geological implications of Shasongwula Rapakivi granite in East Kunlun Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 49(4): 62–72(in Chinese with English abstract).
- Deng J, Wang Q F, Li G J. 2016. Superimposed orogeny and composite metallogenic system: Case study from the Sanjiang Tethyan belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2225–2247(in Chinese with English abstract).
- Fan X Z, Sun F Y, Xu C H, et al. 2021. Genesis of Harizha Ag–Pb–Zn deposit in the eastern Kunlun Orogen, NW China: Evidence of fluid inclusions and C–H–O–S–Pb isotopes[J]. *Resource Geology*, 71(3): 177–201.
- Feng C Y, Li D S, Wu Z S, et al. 2010. Major Types, Time–Space Distribution and Metallogenesis of Polymetallic Deposits in the Qimantage Metallogenic Belt, Eastern Kunlun Area[J]. *Northwestern Geology*, 43(4): 10–17(in Chinese with English abstract).
- Feng K, Li R B, Pei X Z, et al. 2022. Zircon U–Pb chronology, geochemistry and geological significance of Late Triassic intermediate–acid volcanic rocks in Boluositai area, East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 47(4): 1194–1216(in Chinese with English abstract).
- Gao Y F, Santosh, Wei R H, et al. 2013. Origin of high Sr/Y magmas from the northern Taihang Mountains: Implications for Mesozoic porphyry copper mineralization in the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78: 143–159.
- Gu Y, Qian Y, Li Y J, et al. 2019. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of Middle and Late Triassic granites in the Luotufeng area, East Kunlun[J]. *Mineral Exploration*, (4): 724–736(in Chinese with English abstract).
- Guo X Z. 2021. The intermediate–acid magmatism and polymetallic mineralization in East Kunlun, Paleo–Tethys[D]. Doctoral Thesis of China University of Geosciences: 147–193(in Chinese with English abstract).
- Guo X Z, Jia Q Z, Zhen Y Y, et al. 2016. Re–Os isotopic dating of molybdenite from Reshui molybdenum polymetallic deposit in the East Kunlun and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*,

- 90(10): 2818–2829(in Chinese with English abstract).
- Gu R P, Bu A, Chen S Q. 2009. Geological characteristics and prognosis of prospects of Jinkeng Cu–Sn–Pb–Zn deposit, Jiexi County, Guangdong Province[J]. *Resource Survey and Environment*, 30(2): 109–114(in Chinese with English abstract).
- Hao N N. 2016. Magmatism and metallogeny in the East Kunlun Orogenic Belt[D]. Doctoral Thesis of China University of Geosciences(Beijing): 38–185(in Chinese with English abstract).
- He S Y, Lin G, Zhong S H, et al. 2023. Geological characteristics and related mineralization of “Qinghai Gold Belt” formed by orogeny[J]. *Northwestern Geology*, 56(6): 1–16(in Chinese with English abstract).
- He S Y, Li D S, Li L L, et al. 2009. Re–Os Age of molybdenite from the Yazigou Copper (Molybdenum) mineralized area in Eastern Kunlun of Qinghai Province, and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(2): 236–242 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Zhou Y, Wang R, et al. 2017. Recycling of metal–fertilized lower continental crust: origin of non–arc Au–rich porphyry deposits at cratonic edges[J]. *Geology*, 45(6): 563–566.
- Hu Y D. 2007. Geological characteristics and mineralizing perspective evaluation of Wulanwuzhuier copper deposit in the Eastern Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Master Thesis of Jilin University: 83–147(in Chinese with English abstract).
- Lei Y L. 2024. Preliminary exploration report of the Gemalong silver polymetallic deposit, Dulan County, Qinghai Province[R]. The Second Geological Exploration Institute of Nonferrous Metals of Qinghai Province: 11–57 (in Chinese).
- Li B L, Zhi Y B, Zhang L, et al. 2015. U–Pb dating, geochemistry, and Sr–Nd isotopic composition of a granodiorite porphyry from the Jiadanggen Cu–(Mo) deposit in the Eastern Kunlun metallogenic belt, Qinghai Province, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 67: 1–10.
- Li D S, Zhang Z Y, Su S S, et al. 2010. Geological characteristics and genesis of the Kaerqueka copper molybdenum deposit in Qinghai Province[J]. *Northwestern Geology*, 43(4): 239–244(in Chinese with English abstract).
- Li Z C, Pei X Z, Bons P D, et al. 2022. Petrogenesis and tectonic setting of the Early–Middle Triassic subduction–related granite in the eastern segment of East Kunlun: Evidences from petrology, geochemistry, and zircon U–Pb–Hf isotopes[J]. *International Geology Review*, 64(5/6): 698–721.
- Li W, Liu Y L, Li W J, et al. 2024. Ore–forming age and material sources of the North Santonggou manganese deposit in East Kunlun of Qinghai: Constrained by Re–Os isotopic chronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(4): 1231–1248(in Chinese with English abstract).
- Li X K, Yuan Y B, Liu X F. 2013. LA–(MC)–ICP–MS U–Pb dating of zircon with quartz porphyry in Yejiwei porphyry copper–tin deposit in Dongpo mine, Hunan Province[C]//Geological Society of China Youth Working Committee. Proceedings of the First National Youth Geological Congress: 200–201(in Chinese with English abstract).
- Li S J, Sun F Y, Feng C Y, et al. 2008. Geochronological study on Yazigou polymetallic deposit in Eastern Kunlun, Qinhai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, (7): 949–955(in Chinese with English abstract).
- Lin Y H, Li J Q, Wang M, et al. 2021. LA–ICP–MS U–Pb zircon dating and geological significance of ore–bearing granodiorit porphyry in Zamaxiuma area, East Kunlun[J]. *Mineralogy and Petrology*, 41(3): 29–39(in Chinese with English abstract).
- Liu J D, Zhang K, Wang B Z, et al. 2023. U–Pb age, geochemical and Hf isotopic characteristics of Late Triassic granodiorite porphyry in Gounao area of Lalinggaoli River, Eastern Kunlun Mountains[J]. *Geological Review*, 69(4): 1525–1542(in Chinese with English abstract).
- Liu J N, Feng C Y, Qi F, et al. 2012. SIMS zircon U–Pb dating and fluid inclusion studies of Xiadeboli Cu–Mo ore district in Dulan County, Qinghai Province, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 679–690(in Chinese with English abstract).
- Liu Z Q. 2011. Study on the geological characteristics and tectonic of Buqingshan melanges belt, the south margin of East Kunlun Mountains[D]. Doctoral Thesis of Changan University: 141–149(in Chinese with English abstract).
- Lu H F, Yang Y Q, He J, et al. 2017. Zircon U–Pb age dating for granodiorite porphyry and molybdenite Re–Os isotope dating of Halongxiuma molybdenum(Tungsten) depositions in the east Kunlun area and its geological significance[J]. *Mineralogy and Petrology*, 37(2): 33–39(in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Luo Z H, Deng J F, et al. 2007. Granitoids and crustal growth in the East–Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 403–414(in Chinese with English abstract).
- Ma Z Y, Zhang A K, Li J, et al. 2023a. Porphyry–hydrothermal metallogenic characteristics and prospecting prospect of Harizha deposit in East Kunlun[J]. *Xinjiang Geology*, 41(4): 538–546(in Chinese with English abstract).
- Ma Z Y, Zhang A K, Li J, et al. 2023b. Study on the occurrence status of silver polymetallic minerals in the V–belt of Harizha deposit in East Kunlun[J]. *Journal of Qinghai University*, 41(6): 78–87(in Chinese with English abstract).
- Ma Z Y, Chai J X, Zhang A K, et al. 2024a. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Harizha–Nagengkangqieer granites in the East Kunlun Orogen[J]. *Earth Science*, 49(5): 1778–1792 (in Chinese with English abstract).
- Ma Z Y, Li J, Zhao J P, et al. 2024b. Discussion on genesis of Wulanwuzhuier–Shizisong Ag–polymetallic deposit in east Kunlunshan area[J]. *Contributions to Geology and Mineral resources Research*, 39(2): 160–168(in Chinese with English abstract).
- Ma Z Y, Li J, Lu D J, et al. 2024c. Prospecting practice of porphyry–hydrothermal metallogenic system in East Kunlun: A case study of the Wulanwuzhuier–Shizisong deposit[J]. *Geology and Exploration*, 60(4): 700–711(in Chinese with English abstract).
- Ma Z Y, Zhang Y, Li J, et al. 2024d. Discussion on metallogenic model of Qingshuihedonggou Mo deposit in East Kunlun area[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 39(3): 293–300(in Chinese with English abstract).
- Pan T, Wang B Z, Zhang A K. 2019. Metallogenic series and prospecting prediction in north and south margin of Qaidam Basin[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press: 11–174(in Chinese with English abstract).
- Pan T, Xue W W, Wang G R, et al. 2021. Geology mineral resources of

- Qinghai province[M]. Beijing: Geological Publishing House: 7–34(in Chinese with English abstract).
- Richards. 2013. Giant ore deposits formed by optimal alignments and combinations of geological processes[J]. *Nature Geoscience*, 6(11): 911–916.
- She H Q, Zhang D Q, Jing X Y, et al. 2007. Geological characteristics and genesis of the Ulan Uzhur porphyry copper deposit in Qinghai[J]. *Geology in China*, 34(2): 306–314.
- Shao F L, Niu Y L, Liu Y, et al. 2017. Petrogenesis of Triassic granitoids in the East Kunlun Orogenic Belt, northern Tibetan Plateau and their tectonic implications[J]. *Lithos*, 282: 33–44.
- Seedorff E, Dilles J H, Proffett J M. 2005. Porphyry deposits characteristics and origin of hypogene features[J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 251–298.
- The Editorial Board of the Geological Atlas of Qinghai Province. 2021. Mineral Geology of China · Qinghai Volume · Popular Edition[M]. Beijing: Geological Publishing House: 7–34.
- Wang H, Feng C Y, Li R X, et al. 2018. Geological characteristics, metallogenesis, and tectonic setting of porphyry–skarn Cu deposits in East Kunlun Orogen[J]. *Geological Journal*, 53: 58–76.
- Wang Y D, Li S H. 2023. Deep prospecting potential analysis of Yikeguole porphyry molybdenum deposit in Qinghai[J]. *Minerals resources and geology*, 37(4): 794–805(in Chinese with English abstract).
- Wang R, Zhu D C, Wang Q, et al. 2020. Porphyry mineralization in the Tethyan orogen[J]. *Science China: Earth Sciences*, 63(12): 2042–2067(in Chinese with English abstract).
- Xiong F H, Ma C Q, Zhang J Y, et al. 2014. Reworking of old continental lithosphere: An important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of the Geological Society*, 171(6): 847–863.
- Xia R, Deng J, Qing M, et al. 2017. Petrogenesis of ca. 240 Ma intermediate and felsic intrusions in the Nan’getan: Implications for crust–mantle interaction and geodynamic process of the East Kunlun Orogen[J]. *Ore Geology Reviews*, 90: 1099–1117.
- Xia R, Qing M, Wang C M, et al. 2014. The genesis of the ore-bearing porphyry of the Tuoketuo porphyry Cu–Au (Mo) deposit in the East Kunlun, Qinghai Province: Constraints from zircon U–Pb geochronological and geochemistry[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(5): 1502–1524(in Chinese with English abstract).
- Xu Q L, Sun F Y, Li B L, et al. 2014. Geochronological dating, geochemical characteristics and tectonic setting of the granite–porphyry in the Mohexiala silver polymetallic deposit, eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2): 421–433(in Chinese with English abstract).
- Xu Q L. 2014. Study on mineralization of porphyry deposits in the East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Doctoral Thesis of Jilin University: 88–152(in Chinese with English abstract).
- Yue Y G, Dong Y P, Sun S S, et al. 2022. Mafic–ultramafic rocks in the Buqingshan Complex of the East Kunlun Orogen, northern Tibetan Plateau: Remnants of the Paleo–Tethys Ocean[J]. *International Geology Review*, 64(22): 1–22.
- Yuan W M, Mo X X, Zhang A K, et al. 2017. Discovery of new porphyry belts in Eastern Kunlun Mountains[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 1–9(in Chinese with English abstract).
- Yin H F, Zhang K X. 1997. Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 339–342(in Chinese with English abstract).
- Zhou T F, Wang S W, Fan Y, et al. 2015. A review of the intracontinental porphyry deposits in the Middle–Lower Yangtze River Valley metallogenic belt, Eastern China[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 433–456.
- Zhang J Y, Yang Z B, Zhang H, et al. 2017a. Controls on the formation of Cu-rich magmas: Insights from the Late Triassic post-collisional Saishitang complex in the eastern Kunlun Orogen, western China[J]. *Lithos*, 278/281: 400–418.
- Zhang H R, Hou Z Q, Yang Z M. 2010. Metallogenesis and geodynamics of Tethyan metallogenic domain: A review[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 113–133(in Chinese with English abstract).
- Zhang D M, Zhang A K, Qu G J, et al. 2020. Metallogenic and prospecting model of Kaerqueka iron–copper polymetallic deposit in western segment of Eastern Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 53(1): 91–106(in Chinese with English abstract).
- Zhang A K, Yuan W M, Liu G L, et al. 2023. Metallogenic regularities and exploration directions of strategic metallic minerals around the Qaidam Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 31(3): 260–283(in Chinese with English abstract).
- Zheng Z H, Zhang Q S, He L, et al. 2022. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of Yikeguole intrusive rocks in eastern segment of East Kunlun and its geological significance[J]. *World Geology*, 41(1): 56–71,84(in Chinese with English abstract).
- Zhang X T, Yao Y, Zheng J, et al. 2017. Diagenetic age of the granite porphyry in northern Aikengdelesite south of East Kunlun and geological implications[J]. *Geology and Exploration*, 53(4): 680–685(in Chinese with English abstract).
- Zhen J H, Dong S S. 2014. Detailed investigation report of Tuoketuo copper gold deposit in Dulan County, Qinghai Province[R]. Qinghai Tangrong Mining Co., Ltd.: 16–54(in Chinese with English abstract).
- Zhan S Z, Zhao H C, Li Z Q, et al. 2013. Copper polymetallic ore survey report of Xiadeboli–Aikengdelesite deposit in Dulan County, Qinghai Province[R]. The Fifth Geological Exploration Institute of Qinghai Province: 36–76(in Chinese with English abstract).
- Zhong S H, Feng C Y, Li D X, et al. 2017. SIMS chronology and geochemistry of diabase dykes from the Weibao polymetallic orefield, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(4): 762–775(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 2005. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. *中国地质*, 32(3): 386–395.
- 才航加, 张金明, 张启龙. 2016. 东昆仑沙松乌拉环斑花岗岩的时代及地质意义[J]. *西北地质*, 49(4): 62–72.
- 邓军, 王庆飞, 李龚健. 2016. 复合造山和复合成矿系统: 三江特提斯例

- 析[J]. 岩石学报, 32(8): 2225–2247.
- 丰成友, 李东生, 吴正寿, 等. 2010. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 43(4): 10–17.
- 封铿, 李瑞保, 裴先治, 等. 2022. 东昆仑造山带波斯太地区晚三叠世中酸性火山岩锆石 U–Pb 年代学、地球化学及地质意义[J]. 地球科学, 47(4): 1194–1216.
- 国显正. 2021. 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]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 147–193.
- 国显正, 贾群子, 郑有业, 等. 2016. 东昆仑热水铜多金属矿床辉钼矿 Re–Os 同位素年龄及地质意义[J]. 地质学报, 90(10): 2818–2829.
- 古润平, 卜安, 陈少青. 2009. 广东省揭西金坑铜锡铅锌矿区矿床地质特征与远景预测[J]. 资源调查与环境, 30(2): 109–114.
- 顾焱, 钱烨, 李子晋, 等. 2019. 东昆仑骆驼峰地区中晚三叠世花岗岩年代学、地球化学及构造意义[J]. 矿产勘查, (4): 724–736.
- 何书跃, 李东生, 李良林, 等. 2009. 青海东昆仑鸭子沟斑岩型铜(钼)矿区辉钼矿铼-钼同位素年龄及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 33(2): 236–242.
- 何书跃, 林贵, 钟世华, 等. 2023. 造山作用孕育“青海金腰带”[J]. 西北地质, 56(6): 1–16.
- 胡永达. 2007. 青海东昆仑乌兰乌珠尔铜矿地质特征及成矿远景评价[D]. 吉林大学硕士学位论文: 13–65.
- 郝娜娜. 2016. 东昆仑造山带岩浆活动与成矿作用[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文: 38–185.
- 雷延利. 2024. 青海省都兰县各玛龙银多金属矿普查报告[R]. 青海省有色第二地质勘查院: 11–57.
- 李文, 刘永乐, 李文君, 等. 2024. 青海东昆仑三通沟北锰矿成矿时代与物质来源: 来自 Re–Os 同位素年代学与地球化学的约束[J]. 岩石学报, 40(4): 1231–1248.
- 李东生, 张占玉, 苏生顺, 等. 2010. 青海卡尔却卡铜钼矿床地质特征及成因探讨[J]. 西北地质, 43(4): 239–244.
- 李世金, 孙丰月, 丰成友, 等. 2008. 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, (7): 949–955.
- 李雪凯, 原垭斌, 刘晓菲. 2013. 湖南东坡矿田野鸡尾斑岩型铜锡矿床含矿石英斑岩锆石 LA–(MC)–ICP–MS U–Pb 测年[C]//中国地质学会青年工作委员会. 第一届全国青年地质大会论文集: 200–201.
- 林艳海, 李积清, 王明, 等. 2021. 东昆仑扎玛休玛地区含矿花岗岩闪长斑岩 LA–ICP–MS 锆石定年及地质意义[J]. 矿物岩石, 41(3): 29–39.
- 刘建栋, 张焜, 王秉璋, 等. 2023. 东昆仑拉陵高里河沟脑地区晚三叠世花岗岩闪长斑岩年代学、岩石地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 地质论评, 69(4): 1525–1542.
- 刘建楠, 丰成友, 元锋, 等. 2012. 青海都兰县下得波利铜钼矿区锆石 U–Pb 测年及流体包裹体研究[J]. 岩石学报, 28(2): 679–690.
- 刘战庆. 2011. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带地质特征及区域构造研究[D]. 长安大学博士学位论文: 41–99.
- 鲁海峰, 杨延乾, 何皎, 等. 2017. 东昆仑哈陇休玛钼(钨)矿床花岗岩闪长斑岩锆石 U–Pb 及辉钼矿 Re–Os 同位素定年及其地质意义[J]. 矿物岩石, 37(2): 33–39.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 2007. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 13(3): 403–414.
- 马忠元, 柴佳兴, 张爱奎, 等. 2024a. 东昆仑哈日扎-那更康切尔银矿区花岗岩年代学、地球化学及岩石成因[J]. 地球科学, 49(5): 1778–1792.
- 马忠元, 张爱奎, 李军, 等. 2023a. 东昆仑哈日扎矿床斑岩-热液成矿特征及找矿远景[J]. 新疆地质, 41(4): 538–546.
- 马忠元, 张爱奎, 李军, 等. 2023b. 东昆仑哈日扎矿床 V 矿带银多金属矿物赋存状态研究[J]. 青海大学学报, 41(6): 78–87.
- 马忠元, 李军, 赵建鹏, 等. 2024b. 东昆仑乌兰乌珠尔-十字嵩银多金属矿床成因研究[J]. 地质找矿论丛, 39(2): 160–168.
- 马忠元, 李军, 逯登军, 等. 2024c. 东昆仑斑岩-热液成矿系统找矿实践——以乌兰乌珠尔-十字嵩矿床为例[J]. 地质与勘探, 60(4): 700–711.
- 马忠元, 张勇, 李军, 等. 2024d. 东昆仑清水河东沟钼矿床成矿模式探讨[J]. 地质找矿论丛, 39(3): 293–300.
- 潘彤, 薛万文, 王贵仁, 等. 2021. 青海矿产地质[M]. 北京: 地质出版社: 7–34.
- 潘彤, 王秉璋, 张爱奎. 2019. 柴达木盆地南北缘成矿系列及找矿预测[M]. 武汉: 中国地质大学出版社: 11–174.
- 余宏全, 张德全, 景向阳, 等. 2007. 青海省乌兰乌珠尔斑岩铜矿床地质特征与成因[J]. 中国地质, 34(2): 306–314.
- 王永德, 李生虎. 2023. 青海益克郭勒斑岩型钼矿深部找矿潜力分析[J]. 矿产与地质, 37(4): 794–805.
- 王瑞, 朱弟成, 王青, 等. 2020. 特提斯造山带斑岩成矿作用[J]. 中国科学: 地球科学, 50(12): 1919–1946.
- 夏锐, 卿敏, 王长明, 等. 2014. 青海东昆仑托克妥 Cu–Au(Mo) 矿床含矿斑岩成因: 锆石 U–Pb 年代学和地球化学约束[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(5): 1502–1524.
- 许庆林, 孙丰月, 李碧乐, 等. 2014. 东昆仑莫河下拉银多金属矿床花岗岩斑岩年代学、地球化学特征及其构造背景[J]. 大地构造与成矿学, 38(2): 421–433.
- 许庆林. 2014. 青海东昆仑造山带斑岩型矿床成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文: 88–152.
- 袁万明, 莫宣学, 张爱奎, 等. 2017. 青海省东昆仑斑岩带新发现[J]. 地学前缘, 24(6): 1–9.
- 殷鸿福, 张克信. 1997. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 22(4): 339–342.
- 湛守智, 赵海超, 李志强, 等. 2013. 青海省都兰县下得波利-埃坑德勒斯特铜多金属矿普查报告[R]. 青海省第五地质矿产勘查院: 36–76.
- 张洪瑞, 侯增谦, 杨志明. 2010. 特提斯成矿域主要金属矿床类型与成矿过程[J]. 矿床地质, 29(1): 113–133.
- 张大明, 张爱奎, 屈光菊, 等. 2020. 东昆仑西段卡而却卡铁铜多金属矿床成矿模式及找矿模型[J]. 西北地质, 53(1): 91–106.
- 张爱奎, 袁万明, 刘光莲, 等. 2023. 柴达木盆地周缘战略性金属矿产成矿规律与勘查方向[J]. 地学前缘, 31(3): 260–283.
- 张雪亭, 姚远, 郑杰, 等. 2017. 东昆仑南坡埃坑北花岗岩斑岩的成岩年龄及其地质意义[J]. 地质与勘探, 53(4): 680–685.
- 郑建华, 东寿山. 2014. 青海省都兰县托克妥铜金矿详查报告[R]. 青海唐荣矿业有限公司, 16–54.
- 郑振华, 张勤山, 何利, 等. 2022. 东昆仑东段益克郭勒侵入岩 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年及其地质意义[J]. 世界地质, 41(1): 56–71, 84.
- 钟世华, 丰成友, 李大新, 等. 2017. 新疆维宝多金属矿区辉绿岩脉 SIMS 年代学和地球化学[J]. 地质学报, 91(4): 762–775.