

DOI: 10.12401/j.nwg.2023191

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

王新雨¹, 王书来¹, 吴锦荣^{2,*}, 王幻¹, 祝新友¹, 王玉往¹,
张坤², 刘明², 杨星¹, 蔡亚伟²

(1. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012; 2. 青海鸿鑫矿业有限公司, 青海 格尔木 816099)

摘要: 东昆仑造山带祁漫塔格地区是青海重要的矽卡岩多金属成矿带, 牛苦头矽卡岩型矿床位于该地区中西段, 为祁漫塔格地区探明的中-大型矽卡岩型铅锌多金属矿床之一。鉴于矿区成岩成矿时代以及金属成矿物质来源存在争议, 笔者通过 LA-ICP-MS 及热表面电离质谱 Re-Os 同位素测试技术对锆石及黄铁矿年代学进行了研究。结果表明, 牛苦头矿区 M1 矿段 10 线钻孔底部成矿花岗岩体年龄分别为 (362.2±2.7)Ma、(361.8±3.4)Ma, 与主成矿阶段闪锌矿密切共生的黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 (359.2±6.3)Ma。牛苦头矿区矽卡岩铅锌多金属矿床成岩与成矿时代耦合于 (362.2±2.7)~(359.2±6.3)Ma, 表明该矽卡型铅锌多金属矿床形成于华力西期晚泥盆世。黄铁矿初始 ¹⁸⁷OS/¹⁸⁸Os 值为 0.13±0.24, 表明牛苦头铅锌矿床金属成矿物质为壳幔混合来源, 形成于晚泥盆世早古生代—晚古生代早期构造-岩浆旋回中碰撞-后碰撞的拉伸背景之下。

关键词: Re-Os 年代学; 成岩与成矿时代耦合; 金属成矿物质来源; 壳幔混合

中图分类号: P588.12; P597.3; P618 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2023)06-0071-11

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

WANG Xinyu¹, WANG Shulai¹, WU Jinrong^{2,*}, WANG Huan¹, ZHU Xinyou¹, WANG Yuwang¹,
ZHANG Kun², LIU Ming², YANG Xing¹, CAI Yawei²

(1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources Co., Ltd, Beijing 100012, China; 2. The Qinghai Hongxin Mining Co., Ltd, Golmud 816099, Qinghai, China)

Abstract: The Qimantagh area of East Kunlun orogenic belt is an important skarn-type polymetallic mineralization belt in Qinghai, and the Niukutou deposit is located in the central-western part of this area, which is one of the middle-large Pb-Zn skarn deposits in Qimantagh area. In view of the controversy about the diagenetic and metallogenic age and the source of the metal ore-forming materials of Niukutou ore district, the zircon and pyrite chronology has been studied by LA-ICP-MS and thermal surface ionization mass spectrometry Re-Os isotope testing technology in this paper. The results show that the ages of the ore-forming granite bodies at the bottom of the 10 line drill hole in the M1 ore block of Niukutou ore district are (362.2±2.7) Ma and (361.8±3.4)

收稿日期: 2023-07-02; 修回日期: 2023-10-19; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国铜业重点科技项目“青海省格尔木牛苦头及外围铅锌成矿规律研究与潜力评价”(QHHX-KZ-JF2020-001)资助。

作者简介: 王新雨(1991-), 男, 博士, 高级工程师, 从事矽卡岩铅锌矿成矿理论研究。E-mail: wxyu1991@126.com。

* 通讯作者: 吴锦荣(1985-), 男, 工程师, 长期从事矿产勘查和矿床地球化学研究。E-mail: 316105398@qq.com。

Ma respectively, and the Re–Os isochron age of the pyrite closely associated with the sphalerite in the main mineralization stage is (359.2 ± 6.3) Ma. This shows that the diagenesis and mineralization age of the skarn Pb–Zn polymetallic deposit in Niukutou ore district are coupled at $(362.2 \pm 2.7) \sim (359.2 \pm 6.3)$ Ma, which further indicates that the skarn Pb–Zn polymetallic deposit was formed in the late Devonian of Variscan. The initial $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ of pyrite is 0.13 ± 0.24 , which indicates that the metal ore-forming materials of Niukutou Pb–Zn deposit are of crust mantle mixed source, and formed under the extensional background of collision–post collision in the tectonic magmatic cycle from Early Paleozoic to early Late Paleozoic at Late Devonian.

Keywords: Re–Os chronology; coupling of diagenetic age and mineralization age; source of metal minerals; crust mantle mixing

青海东昆仑地区是中国重要的造山带之一(吴树宽等, 2023), 祁漫塔格成矿带位于该造山带西段(图 1a)。近年来, 随着该地区众多岩浆热液型多金属矿床(点)的发现, 其已逐渐成为中国西部重要的、最具找矿潜力的成矿远景勘查区之一, 引起了地质科研者们浓厚的研究兴趣, 推动了该地区成矿规律研究工作的不断进行(丰成友等, 2011; 张爱奎, 2012; 高永宝等, 2014; 钟世华等, 2017a, 2017b)。

牛苦头多金属矿床位于祁漫塔格成矿带中段野马泉–开木棋河东侧(图 1b), 前人对牛苦头矿区开展了一系列研究工作, 认为牛苦头矿区矽卡岩底部隐伏的花岗闪长岩为成矿岩体(蒋成伍, 2013; 贾建团, 2013), 其成矿时代与区域大多数铅锌多金属矿床(卡尔却卡、虎头崖、肯德可克、野马泉、尕林格等铁多金属矿床)成矿时代一致, 为晚三叠纪。随着牛苦头矿

区勘查工作的进展以及研究工作的不断深入, 前人逐渐意识到, 华力西期(晚泥盆世)可能为矿区主要成矿岩体(李加多等, 2019; 王新雨等, 2020, 2021)。然而证据不够充分, 尤其是矿石矿物年代学成矿研究工作较为空白。此外, 矿区成矿物质来源问题一直没有很好的解决, 前人研究仅仅从成矿岩体以及金属中 S、Pb 的物质来源着手(王新雨等, 2021), 金属成矿物质来源研究较为匮乏。

金属矿物 Re–Os 测年是近年来矽卡岩多金属矿床成矿时代研究较为有效的一种测年方法, 其中, 最为有效的属于辉钼矿 Re–Os 测年(李超等, 2016)。然而, 对于辉钼矿含量较低的多金属矿床来说, 辉钼矿测年具有较大的难度和局限性。而黄铁矿、黄铜矿中 Re 含量低, 并且具有一定的初始 Os, 其 Re–Os 等时线年龄不仅能够限定金属矿物成矿时代, 而且能够

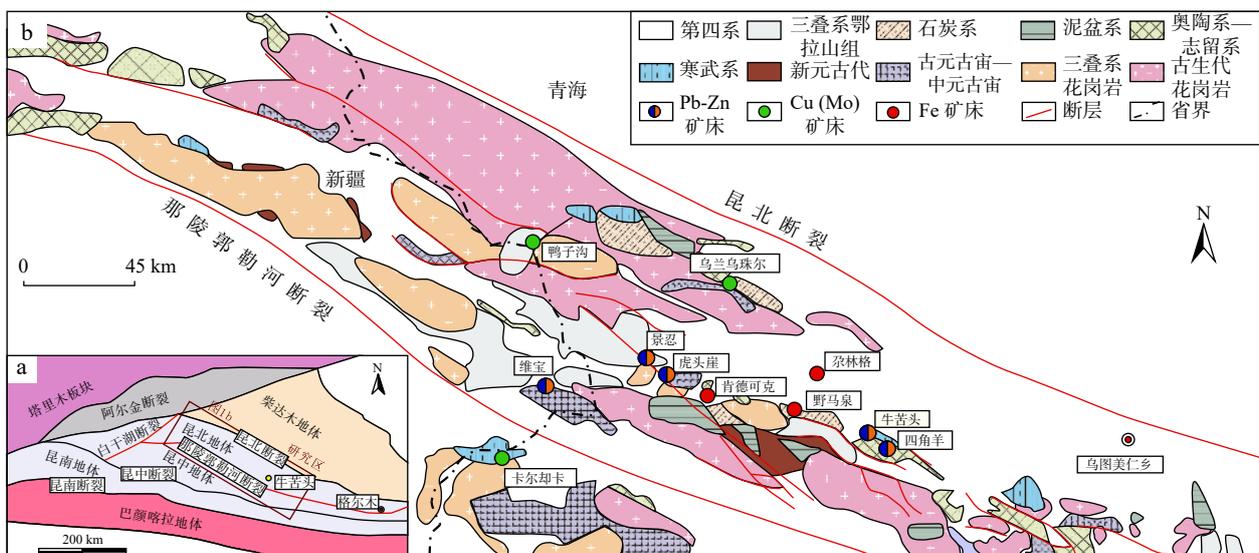


图 1 东昆仑造山带地区地质构造简图(a)与祁漫塔格区域地质矿产简图(b)
(据丰成友等, 2012; 钟世华等, 2017a, 2017b; 王新雨等, 2021 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic sketch map of east Kunlun orogenic belt and (b) mineral deposit distribution in the Qimantage area

示踪金属矿物成矿物质来源(李超等, 2009)。

笔者拟从成矿岩体锆石 U-Pb 年代学、矿石矿物 Re-Os 年代学入手, 探讨成岩时代与成矿时代的耦合关系, 为矿区铅锌矿床成矿时代提供新的有力证据。尝试采用黄铁矿的同位素初始比值对其成矿物质来源进行示踪, 以解决牛苦头多金属矿床的成矿时代以及成矿来源等成矿相关问题, 为研究野马泉-牛苦头-四角羊地区砂卡岩型铁锌多金属矿床成矿地质特征、矿床成因以及找矿预测工作提供相关理论依据。

1 地质背景

1.1 区域地质

东昆仑造山带西侧的祁漫塔格成矿带位于青藏高原中北部, 成矿条件较为优越(毛景文等, 2012; Yu et al., 2017; 刘渭等, 2021)(图 1a、图 1b)。成矿带地区出露地层复杂, 主要包括以下地层与岩性: 新元古界金水口群主要为一套夹片岩、大理岩、片麻岩的混合岩; 上奥陶统滩间山群岩组主要为一套夹火山岩组的碎屑岩地层; 下石炭统大干沟组与缙敖苏组为一套沉积碳酸盐地层, 岩性包括生物碎屑灰岩、大理岩、白云岩、鲕粒状灰岩和砂岩; 下—中二叠统打柴沟组为一套灰岩夹炭质条带岩的岩石组合; 第四系包括风积、冲积物和亚砂土。该地区构造活动发育较为复杂, 构

造受昆中、那陵郭勒断裂影响, 产状主要呈 NWW、NW 向, 局部近 EW 向, 也常常发育近 EW 向的褶皱构造。区内岩浆岩被第四系覆盖严重, 侵入岩发育强烈, 时代分为华力西期和印支期 2 组, 受 NWW 和 N 向构造断裂控制明显。

1.2 矿床地质

牛苦头矿区出露地层为上奥陶统滩间山群岩组与第四系(图 2)。滩间山群在本矿区表现为一套浅海相沉积地层(碳酸盐岩、碎屑岩), 岩性表现为灰岩、大理岩、条带状灰岩、碳质灰岩、粉砂岩、泥质粉砂岩。矿区内断裂分为 NWW 和 NE 向, 以 NWW 向为主, 为昆北断裂的次级分支断裂, 但 NE 向也同样明显, NE 向构造代表主要为牛苦头沟和四角羊沟断裂。矿区内岩浆岩种类复杂, 包括辉长闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、似斑状花岗岩以及富石英花岗岩类等, 空间穿插关系复杂。

矿区 M1 矿段作为其主要开采地段, 其矿体类型主要为层状或不规则脉状矿体, 矿石成分主要为磁黄铁矿、闪锌矿、磁铁矿、方铅矿、黄铜矿、黄铁矿, 可见少量毒砂与赤铁矿。矿石构造主要呈块状、浸染状、细脉浸染状、条带状以及班杂状。M4 矿段矿体产状、矿石结构构造与 M1 基本类似, 但其矿石成分与 M1 矿段有所区别, 矿石中磁铁矿含量较大, 其次为磁黄铁矿、闪锌矿、黄铁矿, 方铅矿含量较少。

矿区主要矿体顺层产出, 受地层和硅钙面控制明

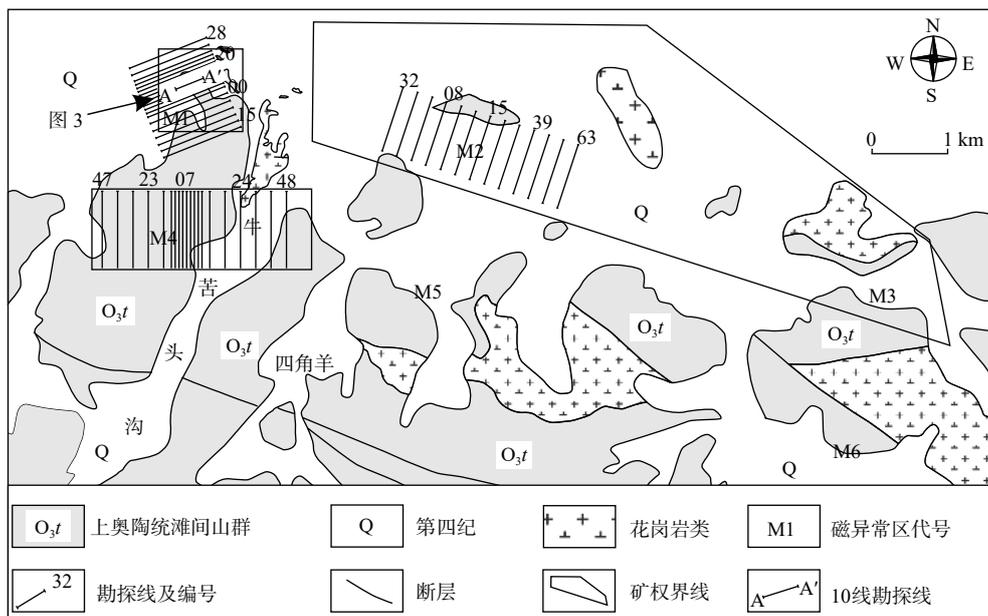


图 2 牛苦头矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Niukutou ore district

显(图3),局部受导矿构造影响,可切穿地层。脉石矿物与区域上其他矽卡岩矿床有所区别,局部矽卡岩Mn含量较高,与铅锌矿化关系密切。脉石矿物包括(锰)阳起石、(锰)黑柱石、(锰)钙铁辉石、石榴子石、

硅辉石、石英、方解石、绿帘石、绿泥石等(图4)。花岗岩体位于矿体与矽卡岩之下,为二长花岗岩-花岗闪长岩组合,蚀变为绿泥石化、钾化及少量辉石化,局部花岗岩中可见星点状闪锌矿化与黄铁矿化。

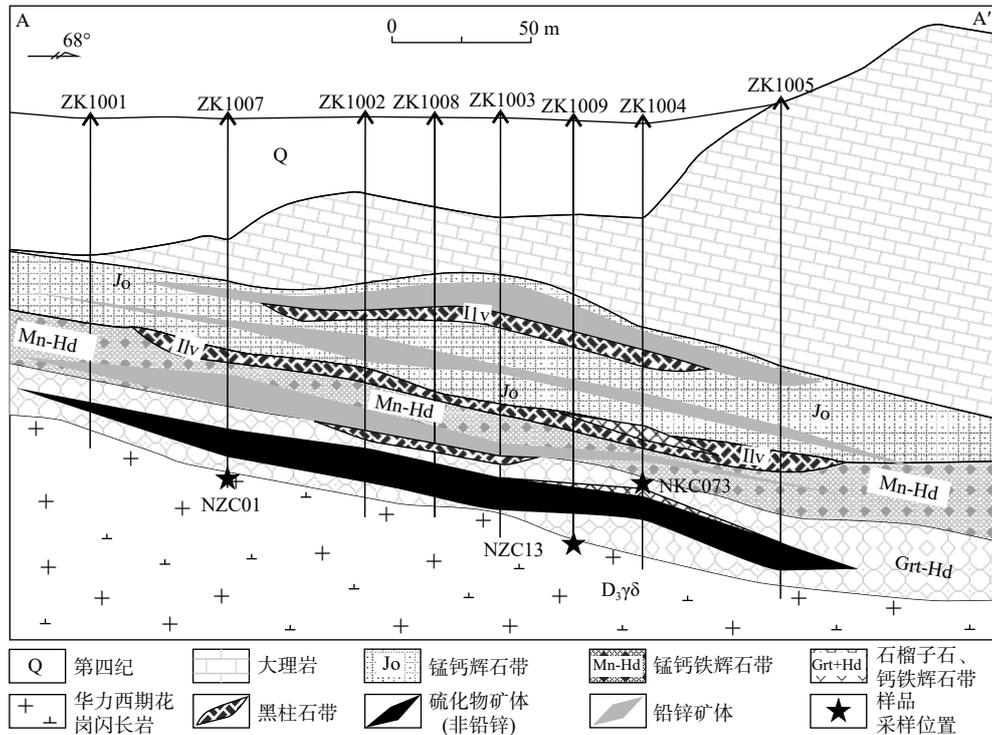


图3 牛苦头 M1 磁异常区 10 号地质勘探线剖面图

Fig. 3 Geological profile of No.10 exploration line n in M1 magnetic anomaly area of Niukutou deposit

2 样品采集与测试方法

研究样品产自 M1 矿段 10 线钻孔底部,岩性分别为花岗闪长岩和二长花岗岩(图 5a、图 5b),取样位置见图 3。

M1 矿段钻孔底部花岗闪长岩,经鉴定岩性为中粒钾化黑云母花岗闪长岩(图 5a),石英含量约为 25%,自形-半自形结构,粒径为 0.6~1.5 mm。斜长石,自形结构,含量约为 55%,粒径为 1~1.5 mm,斜长石表面多发生泥化、绢云母化。钾长石含量约为 10%~15%,粒径为 0.5~0.8 mm,多为正长石,局部表面发育泥化。黑云母含量约为 3%~5%,片状,局部为泥化。花岗闪长岩中普遍发育钾化、硅化、绢云母化,表明 M1 底部岩体发生较强的热液蚀变(图 5c)。

M1 矿段钻孔底部二长花岗岩一般为中细粒结构(图 5b),块状构造,其主要由石英(35%)、正长石(35%)、斜长石(25%)和黑云母(5%)组成。斜长石中可发现

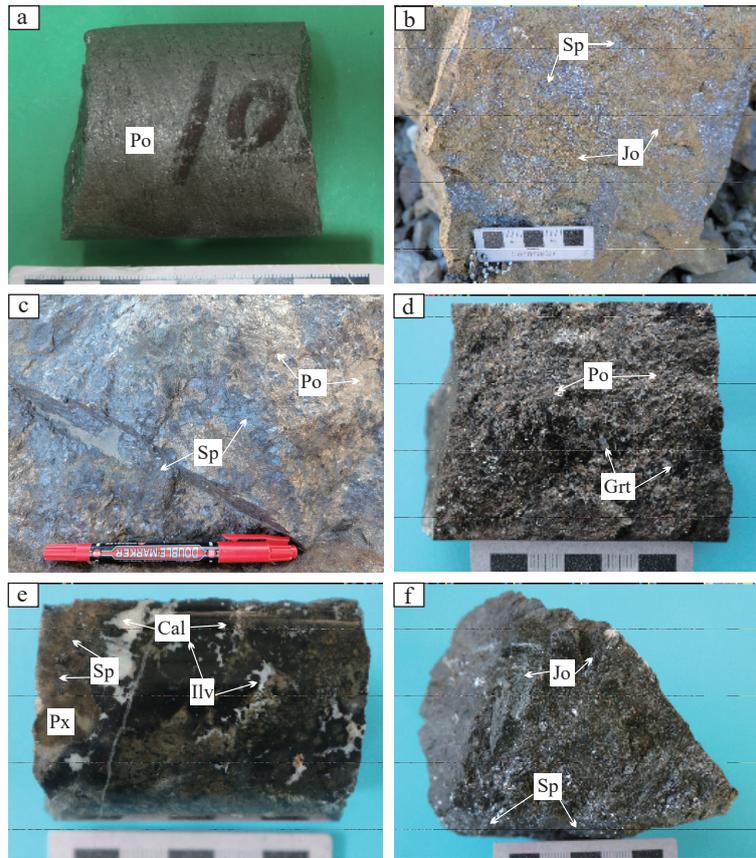
具有环带结构的中长石。蚀变主要为长石的钾化和绢云母化,同时普遍发育浸染状黄铁矿化(图 5d)。

选取 M1 矿段 10 线钻孔 ZK1007、ZK1009 底部的 2 件花岗闪长岩(NZC01、NZC13)进行锆石 U-Pb 定年分析(图 3)。Re-Os 测年样品则选择 M1 矿段 ZK1004 钻孔底部黄铁矿闪锌矿矿石样品 6 件作为测试对象(图 3)。

3 测试方法

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年

花岗岩锆石测年在合肥工业大学矿物原位分析实验室完成,分析仪器为 Agilent7900 电感耦合等离子质谱仪(美国),与之配套的为美国生产的 Analyte 气态准分子激光剥蚀系统。激光以 He 为载气,统一剥蚀半径为 30 μm。标样采用 91500、PLE 为外标的锆石进行校正,每测 10 个样品,用 2 个 91500 标样和 1 个 PLE 标样进行校正。随时观察仪器的信号,以保证



a. 块状磁黄铁矿矿石; b. 斑杂状闪锌矿化, 产于锰钙辉石矽卡岩中; c. 块状闪锌矿、磁黄铁矿矿石; d. 磁黄铁矿化石榴子石矽卡岩; e. 闪锌矿化含方解石黑柱石辉石矽卡岩; f. 闪锌矿化锰钙辉石矽卡岩; Q. 石英; Cal. 方解石; Ilv. 黑柱石; Jo. 锰钙辉石; Px. 辉石; Sp. 闪锌矿; Po. 磁黄铁矿; Grt. 石榴子石

图4 岩石、矿石手标本图

Fig. 4 Specimens of rocks and ores

数据的精确有效。数据处理及普通 Pb 校正采用 CP-MS-Da-Ta-Cal(Liu, 2010; 李艳广等, 2023)和 EXCEL 宏程序 ComPbCorr#3-17(Andersen, 2002), 年龄谱和图解使用 Isoplot3.0 获取(王新雨等, 2021)。

3.2 黄铁矿 Re-Os 测年

用于黄铁矿 Re-Os 同位素测试的样品采自牛苦头 M1 矿段 ZK1004 钻孔底部块状矿石, 共 6 件, 其中块状矿石中黄铁矿与磁黄铁矿、闪锌矿共生, 为同阶段硫化物。将包含黄铁矿的闪锌矿矿石进行粉碎, 剔除杂物, 保证实验的黄铁矿样品纯度高于 99%。

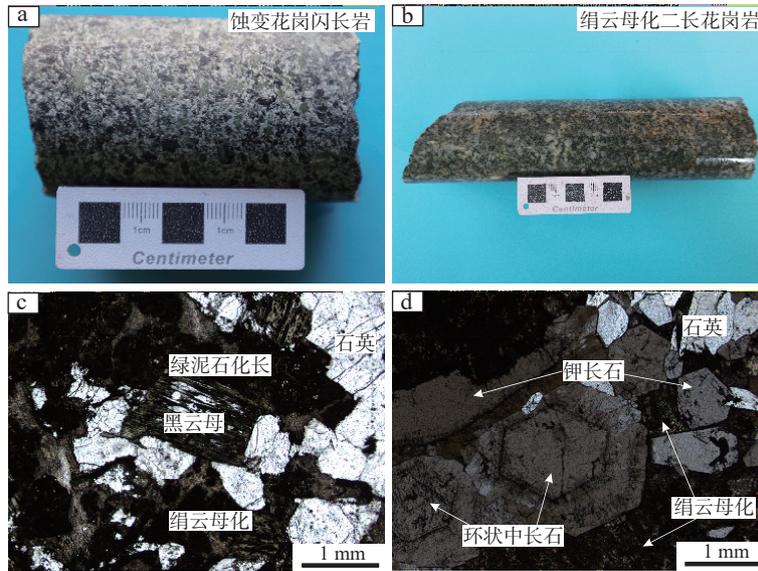
在中国地质科学院国家测试中心进行了黄铁矿 Re-Os 同位素组成测定。对于黄铁矿含量低的样品, 采用逐级剥谱法扣除 O 同位素的干扰。其中 Re 同位素质量分馏校正采用的普通 Re 的 $^{185}\text{Re}/^{187}\text{Re}$ 值为 0.59738。而 Os 同位素质量分馏校正采用 $^{192}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值作为内标(杜安道等, 2009)。详细测定方法及流程见 2009, 李超等(2016)。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

花岗闪长岩和二长花岗岩采样位置见图 3, 其锆石 U-Pb 同位素组成见表 1。在 CL 图像下, 花岗闪长岩中(NZC01)锆石呈无色透明的长-短柱状(图 6)。长约为 135~265 μm , 宽为 45~75 μm 。大多数锆石具岩浆震荡环带, 局部可见锆石形态残缺不完整, 可能为晚阶段热液作用所致。锆石中 Th 含量为 63×10^{-6} ~ 393×10^{-6} , U 含量为 183×10^{-6} ~ 1085×10^{-6} , Th/U 值为 0.3~0.56(均大于 0.3), 属于典型岩浆锆石成因。20 个锆石 LA-ICP-MS 加权平均年龄为 $(362.2 \pm 2.7)\text{Ma}$ (MSWD=3.9, n=20)(图 6), 均为华力西期晚泥盆纪。

牛苦头 M1 矿段二长花岗岩中(NZC013)锆石 CL 图像晶形较好, 呈无色透明短柱状, 长约为 150~250 μm , 宽约为 80~100 μm , 少数锆石局部出现残缺,



a. M1 矿段钻孔 ZK1007 底部强蚀变花岗闪长岩手标本；b. M1 矿段钻孔 ZK1009 底部蚀变二长花岗岩发育绢云母化；c. M1 矿段钻孔底部强蚀变花岗闪长岩中发育的绢云母化长石(正交偏光)；d. M1 矿段钻孔底部蚀变二长花岗岩中发育的绢云母化长石与环带状中长石(正交偏光)

图 5 牛苦头矿区花岗岩类手标本及镜下照片

Fig. 5 Specimen and microscope photo of the granites from the Niukutou deposit

可能为晚期岩浆热液所致。锆石 Th 含量为 $48 \times 10^{-6} \sim 178 \times 10^{-6}$, U 含量为 $131 \times 10^{-6} \sim 565 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.34~0.57(均大于 0.3), 为典型岩浆锆石成因(王新雨等, 2021)。测得 15 个锆石 LA-ICP-MS 加权平均年龄为 $(361.8 \pm 3.4) \text{Ma}$ (MSWD=2.5, n=15)(图 6), 均属于华力西期晚泥盆纪。

4.2 Re-Os 地球化学

黄铁矿 Re-Os 数据分析结果见表 2。矿石样品中黄铁矿与闪锌矿共生关系见图 7a。牛苦头铅锌矿床黄铁矿中普 Re 含量为 $0.031 \times 10^{-9} \sim 7.887 \times 10^{-9}$, ^{187}Os 含量为 $0.20 \times 10^{-12} \sim 29.96 \times 10^{-12}$, 普 Os 含量较低, 相对于 ^{187}Os 可忽略不计。黄铁矿 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 值为 61.7~32 860, 属于低含量、高放射成因硫化物(LLHR), 黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为 $(359.2 \pm 6.3) \text{Ma}$ (图 7b), 个别数据的等时线年龄为 $(352 \pm 15) \text{Ma}$, 初始 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值为 0.13 ± 0.24 (表 2)。个别数据的等时线年龄与 M4 钻孔底部成矿岩体锆石 U-Pb 年龄一致 $(353.0 \pm 3.6 \text{Ma})$ (王新雨等, 2021)。

5 讨论

5.1 牛苦头铅锌矿床成矿时代

黄铁矿 Re-Os 同位素定年方法, 是解决金属矿床

成矿时代问题一种有效的技术手段。牛苦头 M1 磁异常区铅锌矿与闪锌矿共生的黄铁矿 Re-Os 加权平均值年龄为 $(359.2 \pm 6.3) \text{Ma}$, 代表了牛苦头铅锌矿床的成矿时代为晚泥盆世。该年龄与矿区 M1 和 M4 华力西晚期钻孔底部成矿岩体年龄 $(363 \sim 362 \text{Ma})$ 基本一致, 代表了祁漫塔格地区晚泥盆世存在一期重要的矽卡岩型铅锌成矿作用。综上所述, 华力西期岩浆作用是祁漫塔格矿区一期重要的岩浆侵入作用, 对应于晚泥盆世始特提斯洋后碰撞伸展作用。该期岩浆岩在整个牛苦头矿区普遍都存在, 尤其在 M3 和 M5 地区。因此, 在牛苦头地区 M3 和 M5 磁异常区具有寻找华力西期岩浆岩有关的铅锌矿床。

多数学者认为, 中—晚三叠世是祁漫塔格造山带内非常重要的地质演化阶段(丰成友等, 2012; Yu et al., 2017), 是祁漫塔格地区主要的成矿时期。该阶段下, 构造环境由挤压变为伸展, 有利于岩浆混合作用的发生, 并进行分异演化, 为区内铁锌铜多金属矿化提供了较好的构造条件(高永宝等, 2014)。

然而, 也有部分学者对“印支期作为祁漫塔格地区唯一的矽卡岩成矿期”提出质疑, 并通过事实和证据, 提出该地区多金属成矿与泥盆纪岩浆作用有关(高永宝等, 2014; 宋忠宝等, 2014; 李加多等, 2019)。但未深层次揭露岩体与矿体时空关系以及成矿作用

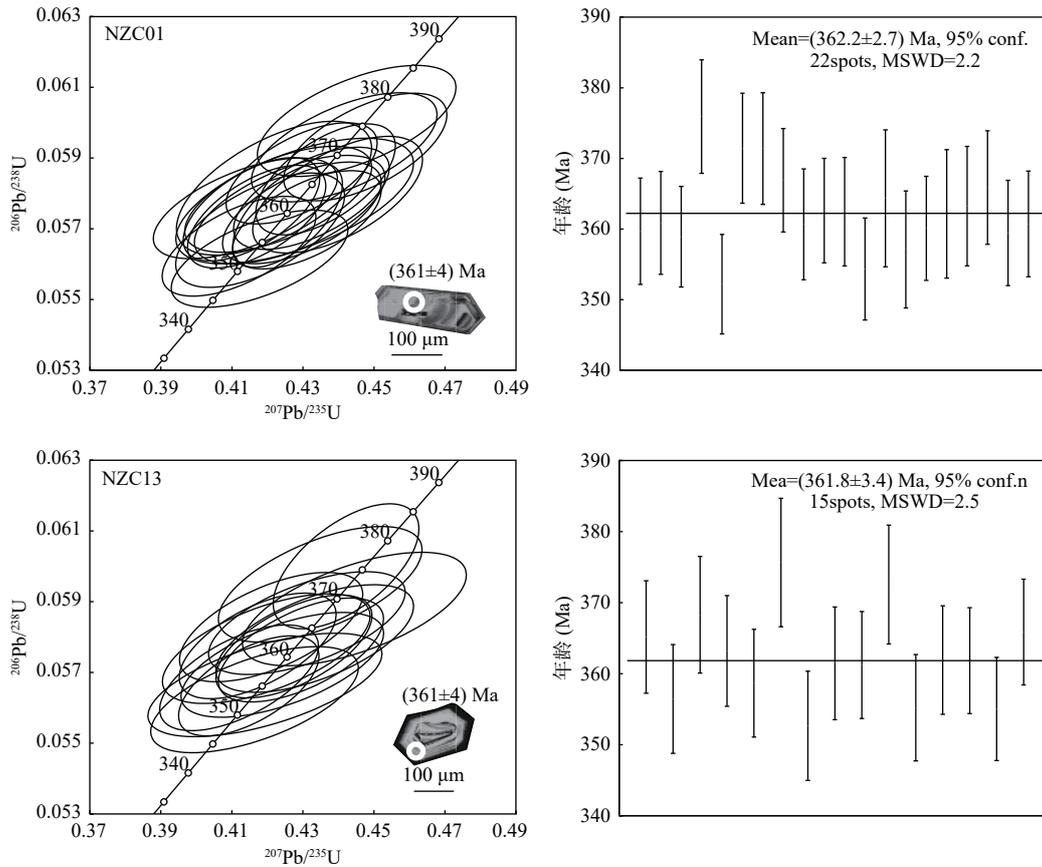


图 6 牛苦头矿区成矿花岗闪长岩、二长花岗岩锆石年龄谐和及加权平均年龄图
Fig. 6 Zircon U-Pb Concordia and weighted average of granitoids in Niukutou ore district

过程。

测试结果表明, M1 矿段钻孔底部成矿花岗闪长岩年龄为(362.2±2.7)~(361.8±3.4)Ma。与与闪锌矿密切共生黄铁矿 Re-Os 等时线年龄为(359.2±6.3)Ma, 年龄与矿区 M1 和 M4 华力西晚期钻孔底部成矿岩体年龄(363~362 Ma)基本一致, 代表了祁漫塔格地区晚泥盆世存在一期重要的矽卡岩型铅锌成矿作用。结合前人发表的有关牛苦头矿区成矿岩体年龄(365~352 Ma)(李加多等, 2019; 王新雨等, 2021), 认为由此确定牛苦头铅锌矿床形成于 362~352 Ma, 属于华力西期晚泥盆世。

综合以上分析, 认为牛苦头矿区 M1、M4 矿段大规模铅锌成矿作用时代为华力西期晚泥盆世。华力西期岩浆岩在整个牛苦头矿区普遍都存在, 尤其在 M3 和 M5 地区。因此, 在牛苦头地区 M3 和 M5 磁异常区具有寻找华力西期岩浆岩有关的铅锌矿床。

这个事实也进一步说明了祁漫塔格地区存在大规模“华里西期铅锌成矿作用”, 为祁漫塔格地区区

别于“印支期成矿作用的”的另一期中酸性岩浆岩找矿标志。

5.2 成矿物质来源

在岩浆演化及成矿流体运移过程中, 由于 Os 亲铁、亲铜的特性, 其可作为示踪成矿物质来源的元素, 由于牛苦头矿床闪锌矿矿石中包含大量黄铁矿。因此, 可以利用黄铁矿的 Os 同位素特征示踪牛苦头矿区闪锌矿的物质来源(丰成友等, 2007; 李超等, 2009)。其中, 地幔中¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值约为 0.12, 而上地壳中的¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os 值约为 1, 牛苦头黄铁矿-闪锌矿矿石的初始(¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os)_i 值为 0.13±0.24, 显示出幔源岩浆参与了成矿。矽卡岩矿床一般由成矿岩体与地层发生交代而形成, 地层和成矿岩体可能同时贡献了成矿物质。牛苦头海西期岩浆岩为祁漫塔格地区晚泥盆世后碰撞造山环境下岩石圈减薄过程中壳幔混合作用的产物(莫宣学等, 2007; 高永宝等, 2014), 牛苦头铅锌多金属矿床成矿物质可能主要来源于壳幔作用的混合。

表1 牛苦头成矿花岗岩锆石U-Pb数据统计表
Tab. 1 U-Pb isotopic compositions of Niukutou granitoids

测点号	U (10^{-6})	Th	Th/U	同位素比值						年龄(Ma)			
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ
NZC01.1	1085	393	0.36	0.05738	0.0006	0.42570	0.0063	0.05385	0.0007	360	2	365	3
NZC01.2	225	74	0.33	0.05758	0.0006	0.41379	0.0106	0.05215	0.0013	361	2	292	5
NZC01.3	266	81	0.30	0.05725	0.0006	0.43111	0.0086	0.05461	0.0010	359	2	396	4
NZC01.4	240	91	0.38	0.06005	0.0006	0.44513	0.0114	0.05378	0.0013	376	2	362	5
NZC01.5	201	71	0.35	0.05615	0.0006	0.41780	0.0102	0.05403	0.0013	352	2	372	5
NZC01.6	358	173	0.48	0.05931	0.0006	0.44755	0.0094	0.05470	0.0010	371	2	400	4
NZC01.7	195	70	0.36	0.05930	0.0006	0.44163	0.0107	0.05402	0.0012	371	2	372	5
NZC01.8	270	114	0.42	0.05856	0.0006	0.42962	0.0087	0.05327	0.0011	367	2	340	4
NZC01.9	183	63	0.34	0.05754	0.0006	0.42627	0.0110	0.05371	0.0013	361	2	359	5
NZC01.10	271	82	0.30	0.05786	0.0006	0.43239	0.0090	0.05411	0.0010	363	2	376	4
NZC01.11	198	102	0.52	0.05783	0.0006	0.42305	0.0107	0.05312	0.0013	362	2	334	5
NZC01.12	259	119	0.46	0.05650	0.0006	0.41202	0.0088	0.05296	0.0011	354	2	327	4
NZC01.13	308	136	0.44	0.05815	0.0008	0.42186	0.0112	0.05264	0.0013	364	3	313	5
NZC01.14	284	115	0.41	0.05696	0.0007	0.41795	0.0097	0.05337	0.0012	357	2	344	5
NZC01.15	241	102	0.42	0.05745	0.0006	0.42972	0.0091	0.05423	0.0011	360	2	381	4
NZC01.16	190	91	0.48	0.05779	0.0007	0.42768	0.0137	0.05392	0.0017	362	3	368	6
NZC01.17	317	177	0.56	0.05796	0.0007	0.43976	0.0098	0.05501	0.0011	363	2	413	4
NZC01.18	387	195	0.50	0.05840	0.0006	0.43639	0.0080	0.05421	0.0009	366	2	380	3
NZC01.19	300	124	0.41	0.05734	0.0006	0.41698	0.0080	0.05282	0.0009	359	2	321	4
NZC01.20	332	162	0.49	0.05755	0.0006	0.41550	0.0079	0.05234	0.0009	361	2	300	3
NZC13.1	201	80	0.40	0.05828	0.0006	0.42108	0.0105	0.05242	0.0012	365	4	357	9
NZC13.2	280	103	0.37	0.05685	0.0006	0.41206	0.0091	0.05264	0.0010	356	4	350	8
NZC13.3	185	68	0.37	0.05879	0.0007	0.44450	0.0129	0.05476	0.0014	368	4	373	11
NZC13.4	208	119	0.57	0.05796	0.0006	0.43336	0.0114	0.05419	0.0013	363	4	366	10
NZC13.5	228	88	0.39	0.05721	0.0006	0.42424	0.0117	0.05394	0.0014	359	4	359	10
NZC13.6	565	178	0.32	0.06000	0.0007	0.44218	0.0084	0.05355	0.0008	376	5	372	7
NZC13.7	193	66	0.34	0.05623	0.0006	0.41640	0.0119	0.05383	0.0015	353	4	353	10
NZC13.8	182	85	0.47	0.05767	0.0006	0.41970	0.0119	0.05307	0.0014	361	4	356	10
NZC13.9	244	120	0.49	0.05763	0.0006	0.42948	0.0095	0.05409	0.0011	361	4	363	8
NZC13.10	185	66	0.36	0.05949	0.0007	0.43490	0.0117	0.05297	0.0013	373	4	367	10
NZC13.11	131	48	0.37	0.05665	0.0006	0.41935	0.0135	0.05376	0.0016	355	4	356	11
NZC13.12	247	91	0.37	0.05775	0.0006	0.41730	0.0090	0.05248	0.0010	362	4	354	8
NZC13.13	251	106	0.42	0.05773	0.0006	0.42749	0.0090	0.05371	0.0010	362	4	361	8
NZC13.14	284	107	0.38	0.05662	0.0006	0.41479	0.0081	0.05314	0.0009	355	4	352	7
NZC13.15	167	56	0.34	0.05839	0.0006	0.43116	0.0113	0.05354	0.0013	366	4	364	10

表 2 牛苦头铅锌矿床黄铁矿 Re-Os 同位素数据统计表

Tab. 2 Re-Os data of pyrite from Niukutou Pb-Zn skarn deposit

样品号	Re (10^{-9})		普Os (10^{-9})		^{187}Re (10^{-9})		^{187}Os (10^{-9})		$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$		$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$		模式年龄 (Ma)	
	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度	测定值	不确定度
NKC073	7.887	0.058	0.001 2	0.000 0	4.957	0.037	0.029 96	0.000 23	32 860	381	198.0	1.3	361.7	3.7
NKC072	0.363	0.003	0.000 9	0.000 0	0.228	0.002	0.001 36	0.000 01	1963	20	11.69	0.02	356.0	3.7
NZC-115	0.887	0.007	0.006 6	0.000 1	0.557	0.004	0.003 35	0.000 03	648.9	6.7	3.880	0.010		
NKC074	0.214	0.002	0.002 8	0.000 0	0.135	0.001	0.000 79	0.000 01	376.2	4.5	2.222	0.014		
NKC075	0.254	0.002	0.001 4	0.000 0	0.160	0.001	0.000 98	0.000 01	852.6	16.9	5.191	0.078		
NKC076	0.031	0.000	0.002 4	0.000 0	0.019	0.000	0.000 20	0.000 01	61.7	1.4	0.611	0.021		

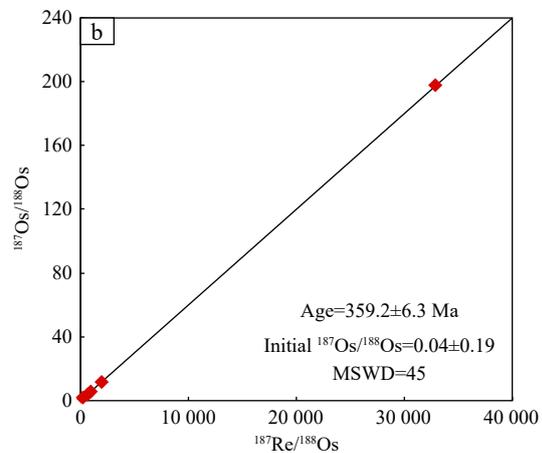
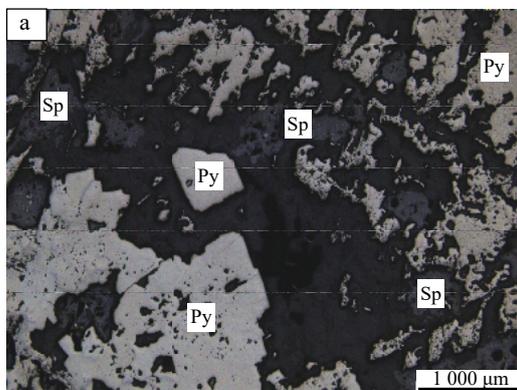


图 7 闪锌矿与黄铁矿镜下共生的显微照片(a)和牛苦头 M1 矿段黄铁矿 Re-Os 同位素等时线图解(b)

Fig. 7 (a) micrograph of sphalerite intergrowth with pyrite and (b) Re-Os isotope isochron of pyrite in M1 ore block of Niukutou ore district

5.3 矿床成因

东昆仑造山带经历了 4 次岩浆构造旋回,形成的岩石构造组合基本上对应于 4 个时代,分别为:元古宙(前寒武纪)、早古生代、晚古生代—早中生代、晚中生代—新生代,其中以晚古生代—早中生代(华力西期—印支期)的岩浆岩较为发育(莫宣学等, 2007; 田龙等, 2023)。各构造旋回相关的成矿作用主要集中在晚古生代—早中生代,其中东昆仑晚古生代成矿包括夏日哈木岩浆岩型铜镍矿床、白干湖矽卡岩—云英岩—石英脉型钨锡多金属矿床,矿床形成时代为 430~422 Ma,属于志留世。该期成矿作用形成于志留纪碰撞造山后局部拉张环境(Zhong et al., 2018)。进入泥盆世(410~360 Ma),形成一系列花岗闪长岩—石英闪长岩—二长花岗岩类,与区内的矽卡岩型铁铅锌铜多金属成矿密切相关,这些侵入岩以 I 型花岗岩为主。目前,发现该时期矿床较少,近年来该时代矿

床也逐渐被重视,其代表矿床包括牛苦头—四角羊铅锌多金属矿床、野马泉 M13 磁异常区铁锌矿床等(高永宝等, 2014; 王新雨等, 2021),形成于区内早古生代—晚古生代早期构造—岩浆旋回的碰撞—后碰撞阶段,由古老陆壳重熔而成,加入部分地幔物质,壳幔岩浆混合作用可能是其大规模集中成矿的主要因素。

结合上述 Re-Os 同位素成矿物质来源分析,可以认为牛苦头矽卡岩型铅锌多金属矿床形成于晚泥盆世祁漫塔格洋俯冲于柴达木地块之下后的碰撞—后碰撞阶段,此时背景下,岩石圈减薄、软流圈上涌,强烈的壳幔相互作用诱发了大规模的岩浆活动,这也与牛苦头矿区成矿岩体中含有大量包体的事实相一致(李加多等, 2019; 王新雨等, 2021)。中酸性晚泥盆世花岗闪长岩—二长花岗岩侵入到滩间山群发生了相互交代作用,晚泥盆世花岗岩类提供了成矿物质,岩浆与滩间山群大理岩接触带提供了赋矿空间,从而形成了

牛苦头矽卡岩型铅锌多金属矿床。

6 结论

(1)牛苦头矿区成矿二长花岗岩与花岗闪长岩时代为(362.2±2.7)~(361.8±3.4)Ma。Re-Os等时线年龄为(359.2±6.3)Ma。成岩与成矿时代耦合,由此确定牛苦头铅锌矿床形成于362~359 Ma。

(2)根据黄铁矿初始值($^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$)_i分析,可以认为牛苦头铅锌矿床金属成矿物质可能主要来源于壳幔相互作用的混合岩浆。

(3)结合已有资料,提出牛苦头铅锌矿床形成于碰撞-后碰撞阶段的拉伸背景之下。

致谢:野外工作得到了青海鸿鑫矿业有限公司技术中心工作人员郭天军、刘明、王燕的大力支持;Re-Os测试技术得到了中国地质科学院国家测试中心李超教授的悉心指导;审稿专家对论文提出了许多宝贵的意见和建议,对以上人员表示衷心的感谢。

参考文献(References):

杜安道, 屈文俊, 李超, 等. 铼-钨同位素定年方法及分析测试技术的进展[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 288-304.

DU Andao, QU Wenjun, LI Chao, et al. A review on the development of Re-Os isotopic dating methods and techniques [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 288-304.

丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 等. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1806-1817.

FENG Chengyou, WANG Xueping, SHU Xiaofeng, et al. Isotopic chronology of the Hutouya skarn lead-zinc polymetallic ore district in Qimantage area of Qinghai Province and its geological significance[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(6): 1806-1817.

丰成友, 丰耀东, 许建祥, 等. 赣南张天堂地区岩体型钨矿晚侏罗世成岩成矿的同位素年代学证据[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 642-650.

FENG Chengyou, FENG Yaodong, XU Jianxiang, et al. Isotope chronological evidence for Upper Jurassic petrogenesis and mineralization of altered granite-type tungsten deposits in the Zhangtiantang area, southern Jiangxi [J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 642-650.

丰成友, 王松, 李国臣, 等. 青海祁漫塔格中晚三叠世花岗岩: 年代学、地球化学及成矿意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 665-678.

FENG Chengyou, WANG Song, LI Guochen, et al. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 665-678.

高永宝, 李文渊, 钱兵, 等. 东昆仑野马泉铁矿相关花岗质岩体年代学、地球化学及 Hf 同位素特征[J]. 岩石学报, 2014, 30(6): 1647-1665.

GAO Yongbao, LI Wenyuan, QIAN Bing, et al. Geochronology, geochemistry and Hf isotopic compositions of the granitic rocks related with iron mineralization in Yemaquan deposit, East Kunlun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(6): 1647-1665.

贾建团. 青海祁漫塔格地区牛苦头铁多金属矿床地质特征研究[J]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013, 1-39.

JIAN Jiantuan. The study on characteristics of iron polymetallic deposit in Niukutou Qimantage district Qinghai[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013, 1-39.

蒋成伍. 青海格尔木市四角羊-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[J]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013: 1-35.

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, 1-35.

李加多, 王新雨, 祝新友, 等. 青海祁漫塔格海西期成矿初探——以牛苦头 M1 铅锌矿床为例[J]. 矿产勘查, 2019, 10(8): 1775-1783.

LI Jiaduo, WANG Xinyu, ZHU Xinyou, et al. The preliminary discussion of the Hercynian metallogenic period in Qimantage area: with the example of Niukutou lead and zinc deposit[J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(8): 1775-1783.

李超, 屈文俊, 杜安道, 等. 铼-钨同位素定年法中丙酮萃取铼的系统研究[J]. 岩矿测试, 2009, 28(3): 233-238.

LI Chao, QU Wenjun, DU Andao, et al. Comprehensive study on extraction of Rhenium with acetone in Re-Os isotopic dating[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2009, 28(3): 233-238.

李超, 裴浩翔, 王登红, 等. 山东孔辛头铜钼矿成矿时代及物质来源: 来自黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素证据[J]. 地质学报, 2016, 90(2): 240-249.

LI Chao, PEI Haoxiang, WANG Denghong, et al. Age and source constraints for Kongxintou copper-molybdenum deposit Shandong from Re-Os isotope in molybdenite and chalcopyrite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(2): 240-249.

李艳广, 靳梦琪, 汪双双, 等. LA-ICP-MS U-Pb 定年技术相关问题探讨[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 274-282.

LI Yanguang, JIN Mengqi, WANG Shuangshuang, et al. Exploration of Issues Related to the LA-ICP-MS U-Pb Dating Technique[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 274-282.

- 刘涓, 杨兴科, 江万, 等. 东昆仑祁漫塔格虎头崖铜多金属矿田构造应力场分析[J]. *西北地质*, 2021, 54(4): 100-112.
- LIU Wei, YANG Xingke, JIANG Wan, et al. Analysis of the Tectonic Stress Field in Hutouya Copper Polymetallic Ore Field, Qimantage of East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(4): 100-112.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 初论中国三叠纪大规模成矿作用及其动力学背景[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1437-1471.
- MAO Jingwen, ZHOU Zhenhua, FENG Chengyou, et al. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1437-1471.
- 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 403-414.
- MO Xuanxue, LUO Zhaohua, DENG Jinfu, et al. Granitoids and crustal growth in the East-Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 403-414.
- 宋忠宝, 张雨莲, 贾群子, 等. 东昆仑祁漫塔格地区野马泉地区深部的华力西期花岗闪长岩 U-Pb 年龄及意义[J]. *现代地质*, 2014, 28(6): 1161-1169.
- SONG Zhongbao, ZHANG Yulian, JIA Qunzi, et al. U-Pb Age of Yemaquan Deep Variscan Granodiorite in Qimantage Area, Eastern Kunlun and Its Significance[J]. *Geoscience*, 2014, 28(6): 1161-1169.
- 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.
- 王新雨, 祝新友, 李加多, 等. 青海牛苦头矿区锰质黑柱石成因及其地质意义[J]. *地质学报*, 2020, 94(8): 2279-2290.
- WANG Xinyu, ZHU Xinyou, LI Jiaduo, et al. Genesis and geological significance of manganilvaite in the Niukutou deposit, Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(8): 2279-2290.
- 王新雨, 祝新友, 李加多, 等. 青海牛苦头矿区两期岩浆岩及其矽卡岩型成矿作用[J]. *岩石学报*, 2021, 37(5): 1567-1586.
- WANG Xinyu, ZHU Xinyou, LI Jiaduo, et al. Two stage magmatism and their skarn-type mineralization in the Niukutou ore district, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(5): 1567-1586.
- 吴树宽, 陈国超, 李积清, 等. 东昆仑东段沟里地区战红山过铝质流纹斑岩年代学、岩石成因及构造意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 92-108.
- WU Shuguan, CHEN Guochao, LI Jiqing, et al. Geochronology, Petrogenesis and Tectonic Significance of Zhanhongshan Peraluminous Rhyolite Porphyry in Gouli Area, Eastern Section of East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 92-108.
- 张爱奎. 青海野马泉地区晚古生代-早中生代岩浆岩作用与成矿研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012: 1-144.
- ZHANG Aikui. Studies on late Paleozoic-early Mesozoic magmatism and mineralization in Yemaquan area, Qinghai province [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012: 1-144.
- 钟世华, 丰成友, 李大新, 等. 新疆维宝矽卡岩铜铅锌矿床维西矿段矿物学特征[J]. *地质学报*, 2017a, 91(5): 1066-1082.
- ZHONG Shihua, FENG Chengyou, LI Daxin, et al. Mineralogical characteristics of the Weixi ore block in the Weibao skarn-type copper-lead-zinc deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017a, 91(5): 1066-1082.
- 钟世华, 丰成友, 任雅琼, 等. 新疆维宝矽卡岩铜铅锌矿床维西矿段成矿流体性质和来源[J]. *矿床地质*, 2017b, 36(2): 483-500.
- ZHONG Shihua, FENG Chengyou, REN Yaqiong, et al. Characteristics and sources of ore-forming fluid from Weixi ore block of Weibao skarn Cu-Pb-Zn deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 2017b, 36(2): 483-500.
- Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1-2): 59-79.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1-2): 537-571.
- Yu Miao, Feng Chengyou, Mao Jingwen, et al. The Qiman Tagh Orogen as a window to the crustal evolution in northern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Review*, 2017, 167: 103-123.
- Zhong S H, Feng C Y, Seltmann Reimar, et al. Geochemical contrasts between Late Triassic ore-bearing and barren intrusions in the Weibao Cu-Pb-Zn deposit, East Kunlun Mountains, NW China: constraints from accessory minerals (zircon and apatite) [J]. *Mineralium Deposita*, 2018, 53(6): 855-870.