

doi: 10.12097/gbc.2024.05.041

青海牛苦头铅锌矿床成矿岩体年龄与矽卡岩矿物学特征

杨新雨¹, 王新雨^{1*}, 王书来¹, 王幻¹, 吴锦荣²

YANG Xinyu¹, WANG Xinyu^{1*}, WANG Shulai¹, WANG Huan¹, WU Jinrong²

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

1. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources Co., Ltd., Beijing 100012, China;

2. The Qinghai Hongxin Mining Co., Ltd., Golmud 816099, Qinghai, China

摘要:【研究目的】祁漫塔格成矿带是中国重要的斑岩-矽卡岩多金属成矿带, 牛苦头矿床为该成矿带近年来发现的大型铅锌多金属矿床, 其成矿岩体时代与矽卡岩建造、铅锌矿化之间的关系缺乏研究。另外, 该矿床矽卡岩形成的物理化学条件与矿化的关系也未进行深入的探讨, 制约了对成矿规律的认识。【研究方法】通过锆石 LA-ICP-MS 测年及电子探针技术分析方法, 对矿区成矿岩体锆石年代及矽卡岩矿物电子探针进行研究, 详细揭示成矿时代、矽卡岩分带及矿物组合特征。【研究结果】结果表明, 与矽卡岩紧密相关的二长花岗岩形成于 389.9 ± 2.2 Ma, 即牛苦头成矿时代为中泥盆世。牛苦头矿床矽卡岩表现出明显的蚀变分带, 整体上属于钙-镁质系列矽卡岩建造, 靠近成矿岩体为一套钙铁榴石和钙铁辉石矿物组合, 远离成矿岩体为一套钙铝榴石和锰钙铁辉石组合。退变质阶段矽卡岩矿物主要为黑柱石、透闪石、阳起石等, 靠近成矿岩体 MnO 含量低, 远离成矿岩体 MnO 含量逐渐增高, 暗示退变质阶段矽卡岩矿物化学成分对于进变质阶段矽卡岩矿物具有一定的继承作用。成矿热液自成矿岩体近端至远端 (西南至东北) 运移, 该过程中温度、 f_{O_2} 、pH 逐渐降低, 矿化由靠近成矿岩体的高温蚀变金属矿化组合到远离成矿岩体的铅锌矿化组合转变。【结论】结合前人研究, 认为祁漫塔格地区中晚泥盆世岩浆岩的侵入可能是钙、镁质矽卡岩建造形成的主要原因, 该地区中—晚泥盆世岩浆岩侵入及与之相关的钙-镁质矽卡岩建造可作为该区域矽卡岩型铅锌矿床的找矿标志, 成矿热液由成矿岩体近端至远端 (西南至东北) 运移的过程中温度、 f_{O_2} 、pH 逐渐降低, 这种物理化学条件的变化是导致成矿岩体远端富锰矽卡岩矿物及铅锌矿化富集的原因。

关键词: 铅锌成矿; 中—晚泥盆世岩浆作用; 钙-镁质矽卡岩建造; 祁漫塔格

创新点: 祁漫塔格成矿带牛苦头矿区大规模铅锌矿化及钙-镁质矽卡岩建造与中—晚泥盆世岩浆岩的侵入密切相关。

中图分类号: P618.41; P618.42 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)04-0587-14

Yang X Y, Wang X Y, Wang S L, Wang H, Wu J R. Study on the age of ore-forming rock mass and mineralogical characteristics of skarn rocks in the Niukutou Pb-Zn deposit, Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(4): 587–600

Abstract: [Objective] The Qimantag metallogenic belt is an important porphyry-skarn polymetallic metallogenic belt in China, and the Niukutou deposit is a large-scale Pb-Zn polymetallic deposit discovered in this metallogenic belt in recent years. However, there is a lack of research on the relationship between the age of the ore-forming rock mass, skarn formation, and Pb-Zn mineralization. Additionally, the relationship between the physicochemical conditions for skarn formation and mineralization in this deposit has not been thoroughly explored, which restricts our understanding of the metallogeny. [Methods] Through the zircon LA-ICP-MS dating

收稿日期: 2024-05-20; 修订日期: 2024-09-30

资助项目: 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》(编号 QHHX-KZ-JF2020-001)

作者简介: 杨新雨(1980-), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事矿产勘查与矿床成矿规律研究。E-mail: 251146157@qq.com

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

and electron probe technology analysis methods, this paper provide detailed information on the mineralization age, skarn zoning, and mineral composition characteristics. **[Results]** The results indicate that the monzogranite closely related to skarn was formed at 389.9 ± 2.2 Ma, indicating that the Niukutou mineralization occurred in the Middle Devonian. The skarn rocks of the Niukutou deposit exhibit obvious alteration zones, and overall belong to the calcium-magnesium series skarn rock formation. Near the ore-forming rock mass, there is a set of andradite and hedenbergite mineral assemblages, while far away from the ore-forming rock mass, there is a set of grossularite and Mn-hedenbergite mineral assemblages. The main skarn minerals in the retrograde metamorphic stage are ilvaite, tremolite, actinolite, etc. The MnO content is low near the ore-forming rock mass, and gradually increases away from the ore-forming rock mass. This suggests that the chemical composition of the skarn minerals in the retrograde metamorphic stage has a certain inheritance from the skarn minerals in the prograde metamorphic stage. The ore-forming hydrothermal fluid migrates from the proximal to distal end of the ore-forming rock mass (southwest to northeast), during which temperature, f_{O_2} , and pH gradually decrease. Mineralization changes from the high-temperature metal mineralization assemblage near the ore-forming rock mass to the Pb-Zn mineralization assemblage distal from the ore-forming rock mass. **[Conclusions]** Based on previous research, this article believes that the calcium-magnesium skarn formation related to Middle-Late Devonian magmatic rocks in the Qimantag may be a prospecting indicator for skarn Pb-Zn deposits in this region. The temperature, f_{O_2} , and pH gradually decrease during the migration of ore-forming hydrothermal fluids from the proximal to distal end (southwest to northeast) of the ore-forming rock mass. This change in physical and chemical conditions is the reason for the enrichment of manganese rich skarn minerals and Pb-Zn mineralization in the distal end of the ore-forming rock mass.

Key words: Pb-Zn mineralization; Middle to Late Devonian magmatism; calcium-magnesium skarn formation; Qimantag

Highlights: The large-scale lead-zinc mineralization and calcium-manganese skarn formation in the Niukutou ore district of the Qimantag metallogenic belt are closely related to the intrusion of the Middle-Late Devonian magmatic rocks.

青藏高原北部、柴达木盆地南缘的祁漫塔格地区(图 1-a), 是中国最重要的矽卡岩多金属成矿带, 同时也是中国重要的矿产资源评价的勘查示范区之一(徐国端, 2010; 毛景文等, 2012; 高永宝, 2013; 宋忠宝等, 2014; 董云鹏等, 2022)。自国家西部大开发

以来, 该成矿带相继发现了尕斯库勒、虎头崖、野马泉、四角羊等一批中大型铁铅锌多金属矿床(丰成友等, 2011; 钟世华等, 2017a; 图 1-b)。

牛苦头矿区位于野马泉矿区以东、四角羊矿区以西, 是区域上较典型的铁铅锌多金属矿床(王新雨

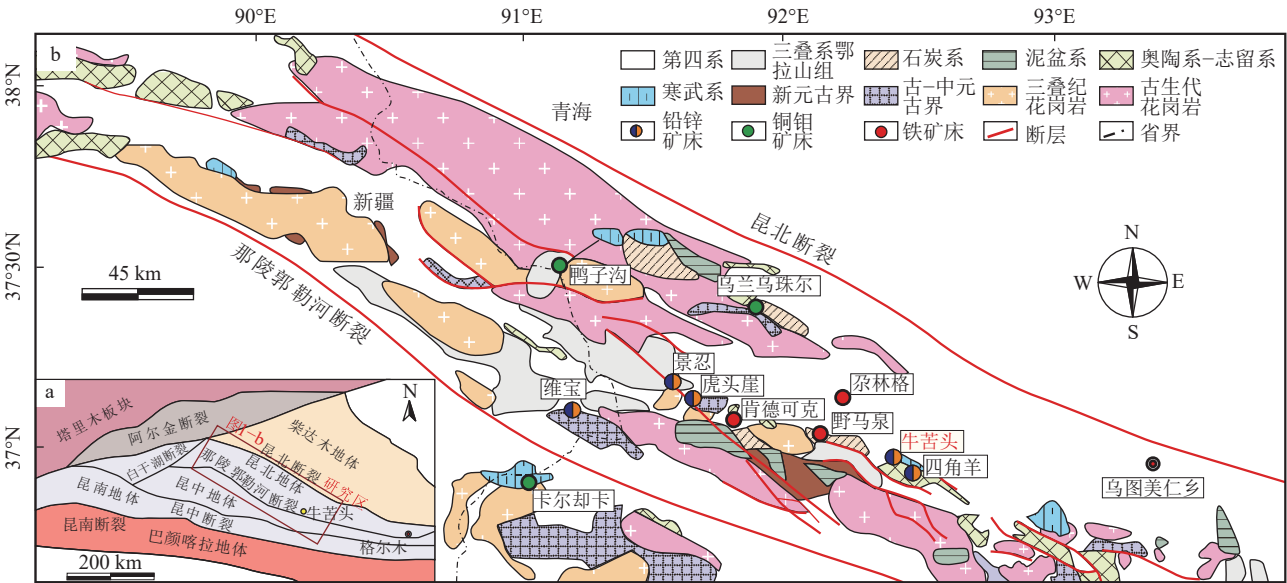


图 1 祁漫塔格区域地质与构造简图(a)与区域地质矿产简图(b)(据徐国端, 2010; Zhong et al., 2018; 王新雨等, 2023 修改)

Fig. 1 Regional geological and tectonic map of Qimantag belt (a) and regional geological and mineral resources map of Qimantag belt (b)

等, 2021, 2023; 图 1-b), 铅锌资源量近 100×10^4 t, 吸引了一大批地质工作者的广泛关注。前人对牛苦头矿床的矿床成因、矿床地质特征、岩浆岩年代学、矿床地球化学特征等方面进行了深入研究(姚磊, 2015; 钟世华等, 2017a; 赵子烨, 2019), 指出该矿床的成矿时代, 与区域上大多数矿床形成于晚三叠世印支期有所不同, 属于中—晚泥盆世。前人将中—晚泥盆世花岗岩分为成矿岩体和非成矿岩体 2 期(王新雨等, 2021; 罗攀等, 2022; 耿健, 2023), 指出成矿岩体二长花岗岩由非成矿岩体花岗闪长岩体分异形成(王新雨等, 2021)。前人研究侧重于花岗闪长岩的成矿时代及岩石地球化学研究(贾建团等, 2013; 蒋成伍等, 2013; 姚磊, 2015; 王新雨等, 2021), 而忽视了二长花岗岩的岩相学及成岩时代研究。另外, 前人揭示了该矿区矿石及脉石矿物组合(李加多等, 2019; 王新雨等, 2020; 罗攀等, 2023; Wang et al., 2023), 而与二长花岗岩空间关系密切相关的矽卡岩矿物组合成分没有精确的测定, 进而影响到对该岩体相关的水平矽卡岩分带、矽卡岩建造及对应的成矿流体性质变化的解释与分析。前人研究基本查明了祁漫塔格成矿带主要存在 3 种类型的矽卡岩建造, 然而, 有关成矿时代与矽卡岩建造的因果关系却缺乏深入探究。

本文以牛苦头铅锌矿床成矿二长花岗岩和矽卡岩蚀变分带为研究对象, 通过 LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子质谱)和电子探针分析方法, 详细查明与矽卡岩、矿体密切相关的二长花岗岩时代及蚀变分带矿物类型, 深入揭示牛苦头矿区铅锌矿床矽卡岩蚀变分带矿物组成及其与矿化关系, 探讨矽卡岩矿物形成时的物理化学条件, 揭示祁漫塔格地区成矿时代与矽卡岩建造的关系, 最终为矽卡岩型铅锌矿床找矿标志研究提供有益参考。

1 矿区地质

矿区出露地层主要为古元古界上奥陶统滩间山群(O_3t)、古生界上石炭统锦奥苏组(C_2d)。赋矿地层主要为滩间山群角岩、大理岩及锦奥苏组大理岩。矿区断裂发育较强烈, 分为北东向和北西西向 2 组。成矿后构造包括北东向四角羊沟断裂和牛苦头沟断裂, 以及北西西向隐伏断裂; 成矿期构造包括陡倾的北东向构造, 该组断裂及其次级断裂为成矿热液活动提供了基础, 为热液运移提供了通道(罗攀

等, 2023)。矿区出露岩浆岩主要为闪长岩、石英闪长岩、二长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩, 与成矿关系密切的岩体岩性主要为花岗闪长岩和二长花岗岩(王新雨等, 2021)。成矿岩体蚀变主要为绢云母化、绿泥石化、绿帘石化、高岭土化等。

牛苦头矿床目前可开采的矿段, 矿体主要深度为 70~110 m, 均为隐伏矿体, 标高 3470~3570 m, 目前已地表露采。已知矿体均产于(底部)花岗闪长岩体上部接触带附近滩间山群的矽卡岩化地层中, 大多为整合产出, 并构成厚 50~80 m 的含矿带。最下部矿体靠近花岗闪长岩—二长花岗岩体, 最上部矿体距岩体之上约 80 m。矿体类型绝大多数为铅锌矿体, 其次有磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿和毒砂矿体。矿体多为透镜状或似层状, 倾向北东向, 倾角较缓, 在 $0^\circ \sim 22^\circ$ 之间。矿体规模不一, 平均品位 Pb 为 1.43%, Zn 为 3.19%, Cu 为 0.33%, S 为 23.82%。矿区主要工业矿体为 1 号矿体和 5 号矿体。其中 1 号矿体规模较大, 矿体赋存于中部的矽卡岩化地层中, 矿体长 500 m, 平均厚度为 6.59 m, 倾向北东, 倾角 $4^\circ \sim 18^\circ$, 矿体形态呈似层状、豆瓣状, 西浅东深, 在倾向及走向上均具分支复合、膨大收缩的特征, 平均品位 Pb 为 1.91%, Zn 为 3.55%, S 为 23.82%。5 号矿体为规模最大的一条矿体, 赋存于深部矽卡岩化地层中, 矿体长 925 m, 倾向北东, 倾角 $1^\circ \sim 22^\circ$, 平均厚度为 13.01 m, 平均品位 Pb 为 1.07%, Zn 为 3.01%, Cu 为 0.33%, S 为 24.36%。

矿体分上、下 2 层, 呈层状、似层状分别赋存于大理岩、角岩及矽卡岩化地层中, 大理岩中呈浸染状、块状及不规则状, 矿石以条带状、稠密浸染状、块状构造为主。矿石结构主要为不等粒粒状变晶结构、粒柱状变晶结构。矿石矿物主要为磁黄铁矿、磁铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿, 局部可见毒砂、蓝铜矿和赤铁矿, 脉石矿物包括常见的一些矽卡岩矿物, 例如石榴子石、辉石、锰钙铁辉石、角闪石、透闪石、阳起石、富锰阳起石、黑柱石、锰质黑柱石、石英、方解石、绿帘石、绿泥石等(王新雨等, 2020; 图 3)。以牛苦头矿区 M1 矿段为例, 自二长花岗岩向外(自西南向东北方向), 矽卡岩及矿化组合逐渐由高温组合向低温组合转变(图 4)。根据矿物穿插关系及生成顺序, 牛苦头矽卡岩型矿床成矿阶段可划分为进变质矽卡岩阶段、退变质矽卡岩阶段、石英-硫化物阶段及碳酸盐阶段(王新雨等, 2021)。

2 样品采集与选取

2.1 二长花岗岩测年样品采集

用于锆石测年的样品采集自 M1 矿权区采坑西南侧,岩性为二长花岗岩,与花岗闪长岩、辉长闪长岩为渐变接触关系,取样位置见图 3。

M1 矿权区二长花岗岩(图 5-a)多为灰色、灰白色

(图 5-a)。经镜下鉴定,其石英含量 27%~32%,半自形结构,大小不一,粒径 1~3 mm(图 5-b)。斜长石含量 25%~30%,半自形—他形结构(图 5-c),多被绢云母化和绿帘石化交代。钾长石含量 20%~25%(图 5-c, d),黑云母和角闪石含量分别为 5%~8%、3%~5%。

2.2 矽卡岩电子探针样品选取

针对 M1 矿权区中矽卡岩矿物石榴子石、辉石、

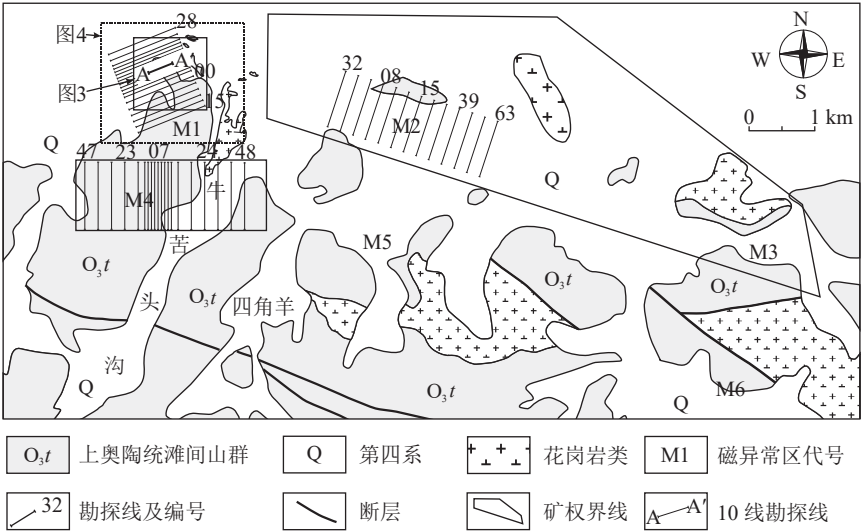


图 2 牛苦头矿区地质简图
Fig. 2 Geological sketch map of the Niukutou ore district

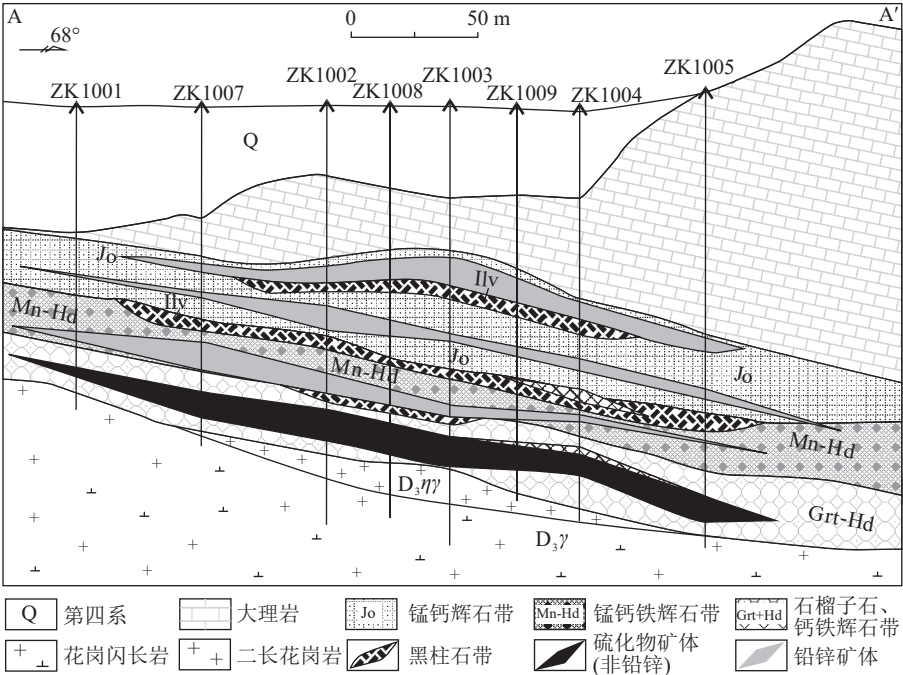


图 3 牛苦头矿区 M1 磁异常区 10 号地质勘探线剖面图(A—A'剖面位置见图 2)
Fig. 3 Geological profile of No.10 exploration line in M1 magnetic anomaly area of Niukutou ore district

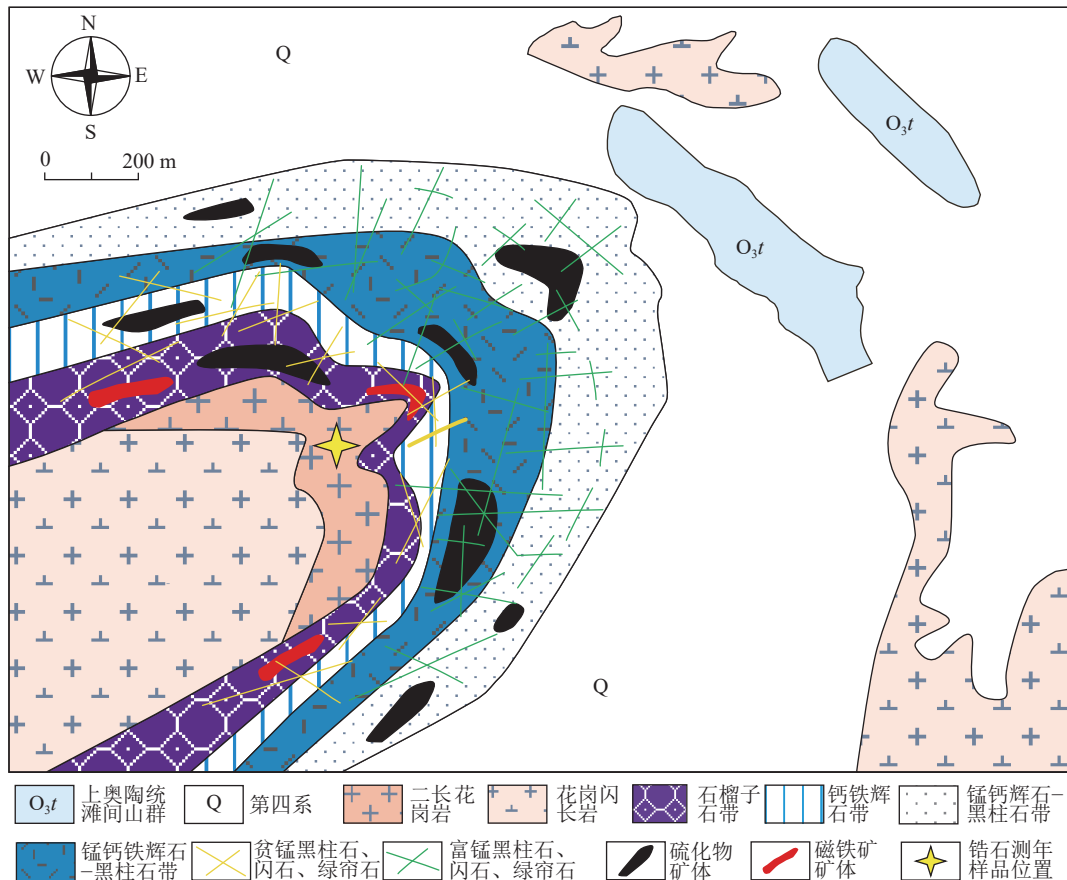


图 4 牛苦头矿床 M1 矿矿区地质简图及矽卡岩平面蚀变带图(位置见图 2)

Fig. 4 Geological map and skarn zoning plane map of the M1 section in Niukutou deposit

阳起石及透闪石, 自成矿岩体向外分别采集石榴子石矽卡岩、辉石矽卡岩、黑柱石矽卡岩及阳起石矽卡岩样品, 对各类矿物进行微区电子探针分析。

3 分析测试方法

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法

锆石微量测试在广州市拓岩检测技术有限公司完成, 测试采用激光剥蚀系统(LA-ICP-MS)。本次激光剥蚀系统采用 NWR(New Wave Research)。为保证结果精确, 氦气被用作载气, 氩气被用作补偿气。采用 30 μm 直径的激光束斑, 频率为 6 Hz。以 91500 锆石、NIST SRM 610 为外标样进行校正 (Slama et al., 2008), 样品空白信号时间为 30 s, 样品剥蚀时间为 40 s, 选取 ICPMSDataCal 作为分析处理软件 (Liu et al., 2008)。同位素数据分析结果见表 1。

3.2 电子探针分析方法

在通过钻孔岩心系统编录和取样分析的基础上, 磨制电子探针片。电子探针片在廊坊拓岩矿

检测服务有限公司, 探针片厚度为 45 μm 。在中国地质科学院地质研究所完成电子探针(EMPA)分析测试工作, 使用的仪器是 JXA-8100 系统(JEOL 公司, 日本东京), 分析参数如下: 加速电压为 15 kV, 束流 $2 \times 10^{-8} \text{A}$, 束斑直径为 5 μm , 光谱为 10s, 使用 ZAF 校正和 SPI 组合标准样品校正。详细测试结果见表 2。

4 分析结果

4.1 锆石年龄

二长花岗岩样品采集位置见图 4, 锆石测年分析结果见表 1。阴极发光(CL)图像分析显示, 二长花岗岩锆石呈透明、具环带的短—长柱状(图 6-a)。长 70~120 μm , 宽 30~70 μm 。Th 含量为 111×10^{-6} ~ 557×10^{-6} , U 含量为 214×10^{-6} ~ 640×10^{-6} , Th/U 值为 0.52~0.94, 均大于 0.3, 表明其为典型岩浆成因锆石。18 个锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 373~394 Ma (图 6-b), 年龄加权平均值为 $389.9 \pm 2.2 \text{ Ma}$ (MSWD=1.07, $n=18$) (图 6-c)。

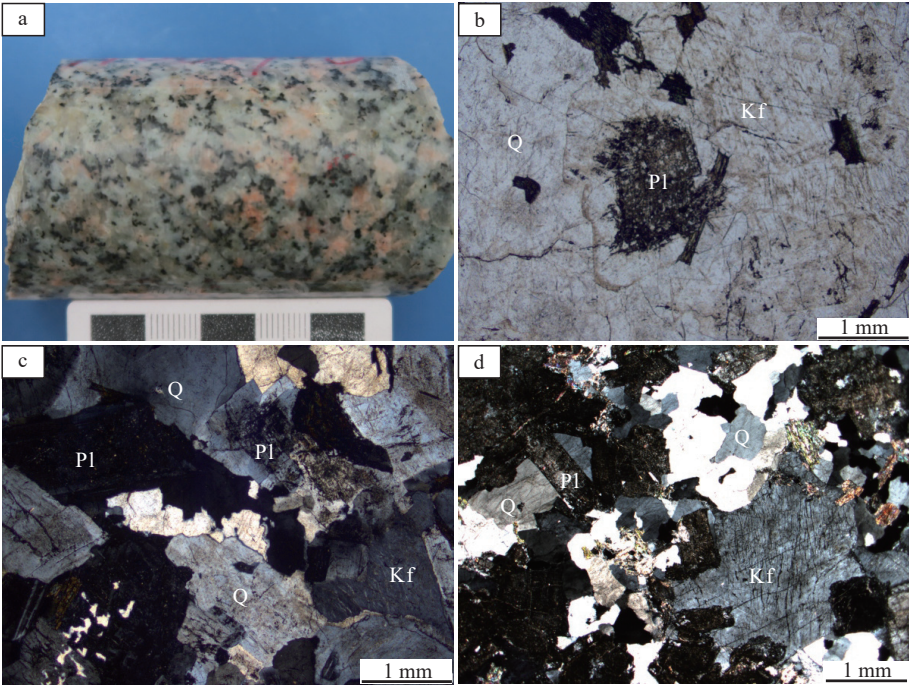


图 5 牛苦头矿区二长花岗岩手标本(a)及镜下照片(b~d)
Fig. 5 Hand specimens (a) and microscopic photos (b~d) of monzogranite in Niukutou ore district
Q—石英; Pl—斜长石; Kf—钾长石

表 1 牛苦头二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素组成

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic compositions of the Niukutou monzogranite

测点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						年龄/Ma			
	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	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
N1012-10.1	225	137	0.61	0.06268	0.0007	0.44835	0.0151	0.05200	0.0018	392	4	376	11
N1012-10.2	295	203	0.69	0.06215	0.0006	0.47332	0.0138	0.05511	0.0016	389	4	393	10
N1012-10.3	482	453	0.94	0.06219	0.0006	0.46007	0.0112	0.05348	0.0012	389	4	384	8
N1012-10.4	251	186	0.74	0.06171	0.0006	0.46418	0.0115	0.05453	0.0014	386	4	387	8
N1012-10.5	214	111	0.52	0.06311	0.0006	0.47258	0.0144	0.05419	0.0016	395	3	393	10
N1012-10.6	183	125	0.68	0.05965	0.0009	0.49444	0.0190	0.06007	0.0023	373	6	408	13
N1012-10.7	389	231	0.59	0.06215	0.0005	0.47091	0.0114	0.05482	0.0013	389	3	392	8
N1012-10.8	640	557	0.87	0.06151	0.0006	0.50814	0.0209	0.05999	0.0028	385	4	417	14
N1012-10.9	426	319	0.75	0.06140	0.0007	0.47571	0.0128	0.05596	0.0013	384	4	395	9
N1012-10.11	210	111	0.53	0.06298	0.0006	0.50475	0.0178	0.05790	0.0020	394	4	415	12
N1012-10.12	470	309	0.66	0.06344	0.0007	0.49962	0.0147	0.05686	0.0015	397	4	411	10
N1012-10.13	331	199	0.60	0.06252	0.0006	0.45931	0.0124	0.05316	0.0014	391	4	384	9
N1012-10.14	455	377	0.83	0.06264	0.0005	0.47064	0.0211	0.05436	0.0024	392	3	392	15
N1012-10.15	225	151	0.67	0.06332	0.0007	0.48701	0.0149	0.05588	0.0018	396	4	403	10
N1012-10.16	257	162	0.63	0.06262	0.0007	0.46100	0.0119	0.05341	0.0014	392	5	385	8
N1012-10.17	311	172	0.55	0.06196	0.0006	0.46648	0.0133	0.05445	0.0015	388	4	389	9
N1012-10.18	338	195	0.58	0.06190	0.0005	0.46640	0.0114	0.05468	0.0014	387	3	389	8
N1012-10.20	339	217	0.64	0.06304	0.0006	0.47879	0.0116	0.05495	0.0013	394	3	397	8

注: 图6-b谱和曲线由除去10,19号点后计算获得, 除去10,19号号点后计算获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 389.9 ± 2.2 Ma(最终结果已校正)

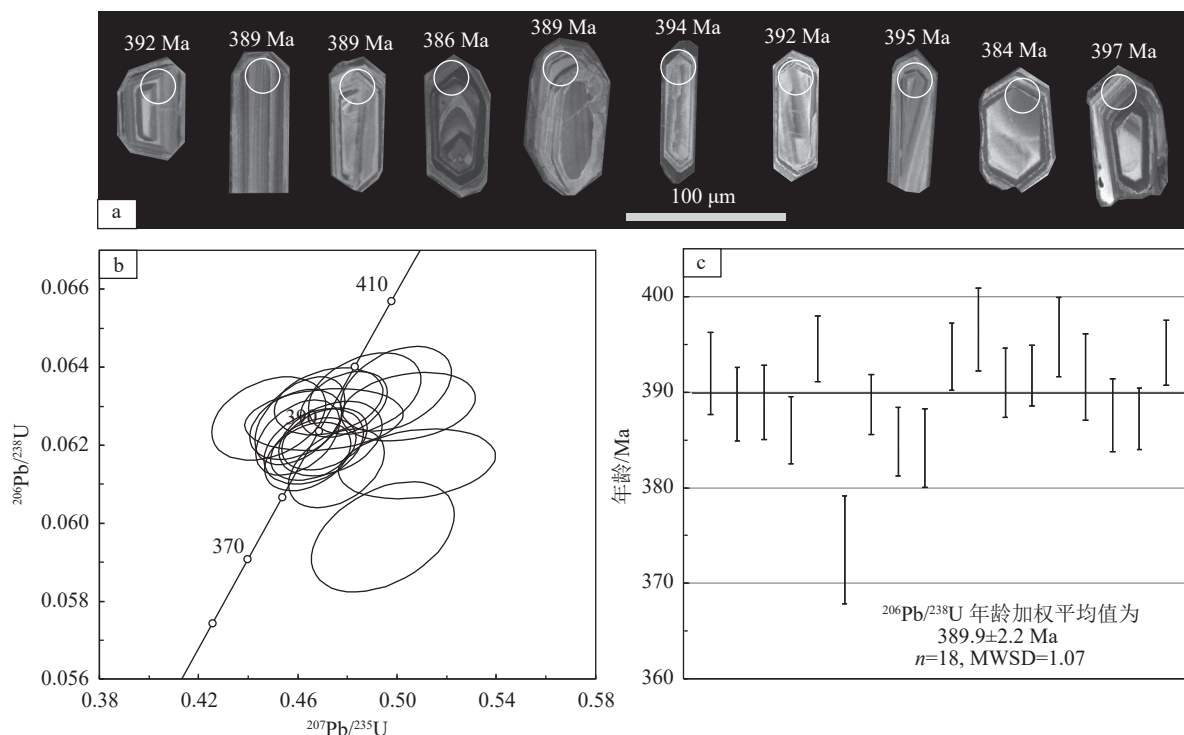


图 6 牛苦头二长花岗岩阴极发光(CL)图像(a)、锆石谐和年龄曲线(b)及年龄加权平均值(c)

Fig. 6 CL image (a), zircon concordia age curve (b) and weighted average (c) of monzogranite in Niukutou deposit

4.2 典型矽卡岩矿物分布特征及成分

4.2.1 石榴子石

靠近成矿岩体, 矽卡岩带中石榴子石成分属于钙铁榴石系列, 自形程度高, 发育明显环带(图 7-a, b), 单偏光下, 整体呈浅褐色, 正交偏光下为全消光。 SiO_2 含量为 35.95%~36.77%, 略低于钙铝榴石, Al_2O_3 含量为 0.62%~0.92%, TFeO 含量在 26.32%~27.59 之间, MnO 含量为 0.07%~0.54%, CaO 含量为 32.27%~34.12%(表 2), 经计算, 其化学式为 $\text{Ad}_{90-96}\text{Gr}_0\text{Sp}_{0-1}$ 。

稍微远离岩体, 石榴子石成分主要为钙铝榴石, 颜色多为棕绿色, 各向异性特征明显, 自形或半自形, 裂纹较发育, 晶体直径一般大于 500 μm (大多数大于 1000 μm)。电子探针分析显示, SiO_2 含量为 37.56%~38.92%, Al_2O_3 含量为 16.53%~25.88%, TFeO 含量在 5.38%~11.35% 之间, MnO 含量为 0.03%~0.86%, CaO 含量为 23.49%~37.19%(表 2), 化学式为 $\text{Ad}_{17-20}\text{Gr}_{66-78}\text{Sp}_{0-2}$, 属于钙铝榴石系列(图 8-a)。单偏光下基本无色, 正交偏光下该石榴子石表现出弱的光性异常(图 7-c)。石榴子石常被晚期绿泥石、绿帘石、磁黄铁矿等矿物交代。

4.2.2 辉石

辉石主要有 2 种类型, 靠近成矿二长花岗岩体,

辉石成分以钙铁辉石为主, 少量透辉石, 暗绿色、褐色。镜下表现出高级黄—绿干涉色及辉石典型的“十字”解理, 与钙铁辉石共生, 是典型的近端(成矿岩体)矽卡岩的特征。

远离成矿二长花岗岩体, 成分主要为锰钙铁辉石(图 7-d~f), 新鲜面为草绿色, 氧化面为棕褐色, 呈短柱状或纤维状, 镜下显示出黄绿干涉色, 其与钙铝榴石共生, 常被阳起石、锰质黑柱石、绿帘石等交代。锰钙铁辉石中 SiO_2 含量为 49.05%~49.16%, Al_2O_3 含量为 0.19%~0.47%, TFeO 含量在 15.23%~17.79% 之间, MnO 高达 9.11%~13.80%, MgO 含量为 0.07%~1.23%, CaO 含量为 21.55%~22.18%(表 2)。辉石中 Di(透辉石)、Hd(钙铁辉石)、Jo(锰钙辉石)组分含量分别为 0.4%~7.6%、52.8%~62.0%、30.4%~46.8%。在辉石分类图解(图 8-b)中, 牛苦头锰钙铁辉石落入钙铁辉石向锰钙辉石过渡的位置。

4.2.3 黑柱石

牛苦头矿区黑柱石手标本颜色为黑色, 呈柱状, 柱面有纵向的晶纹, 长轴 3~10 mm, 溶于盐酸, 溶解后呈白色乳胶状。镜下特征, 单偏光下为黑色—深褐色, 多色性极明显, 反射光下呈淡蓝色(图 7-d~f)。对牛苦头黑柱石进行电子探针分析, SiO_2 含

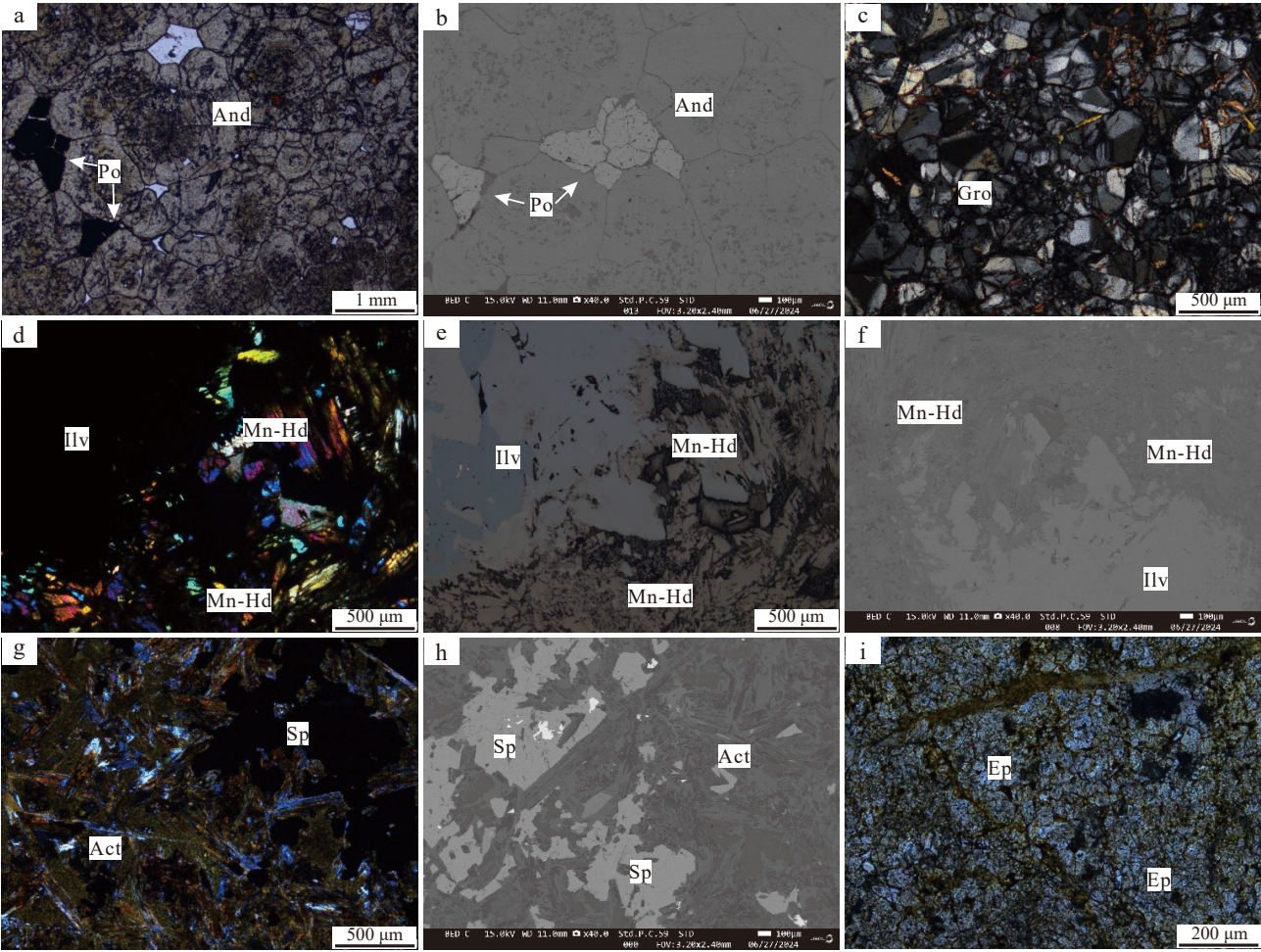


图 7 牛苦头矿区矽卡岩矿物镜下及背散射图像

Fig. 7 Microscopic and BSE photos of skarn minerals in Niukutou ore district

a—钙铁榴石镜下照片, 单偏光; b—磁黄铁矿化钙铁榴石 BSE 照片; c—钙铝榴石镜下照片, 正交偏光; d—锰钙铁辉石和黑柱石镜下照片, 正交偏光; e—锰钙铁辉石和黑柱石镜下照片, 反射光; f—锰钙铁辉石和黑柱石 BSE 照片; g—含锰阳起石和闪锌矿镜下照片, 正交偏光; h—含锰阳起石和闪锌矿 BSE 照片; i—绿帘石镜下照片, 单偏光。And—钙铁榴石; Po—磁黄铁矿; Gro—钙铝榴石; Ilv—黑柱石; (Mn-Hd)—锰钙铁辉石; Act—阳起石; Sp—闪锌矿; Ep—绿帘石

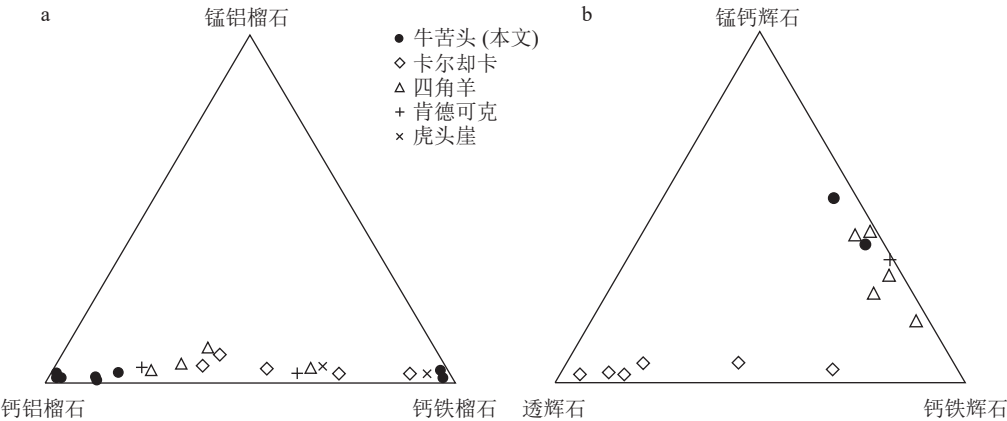


图 8 牛苦头矿区石榴子石和辉石三角分类图解(牛苦头数据据本文, 其余数据据丰成友等, 2011; Zhong et al., 2018b)

Fig. 8 Triangle classification diagrams of garnet and pyroxene in Niukutou ore district

表 2 牛苦头矿床矽卡岩矿物电子探针成分组成

Table 2 Electron microprobe analysis of skarn minerals from the Niukutou deposit %

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	C ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总和	矿物名称
NZB62-2-1	38.453	0.023	17.883		5.381	0.171	0.026	37.135	0.023		99.1	钙铝榴石
NZB62-2-2	37.922	0.006	17.692	0.001	5.224	0.191	0.061	37.187	0.006		98.29	钙铝榴石
NZB62-2-3	38.609	0.01	25.884	0.003	9.134	0.027	0.013	24.561	0.01	0.002	98.25	钙铝榴石
KUB080	37.557	0.025	24.265	0.028	11.346	0.186	0.007	23.492	0.025		96.93	钙铝榴石
NZB73-1	38.693	0.185	24.527	0.021	10.31	0.045	0.049	24.098			97.93	钙铝榴石
JYB-7	38.917		16.527		8.497	0.864	0.018	33.683	0.013		98.52	钙铝榴石
YMB-02	35.945		0.623		27.586	0.073	0.496	34.116	0.043		98.88	钙铁榴石
KUB-214-1	36.769	0.035	0.918	0	26.318	0.543	0.135	32.267	0	0.014	97	钙铁榴石
JYB-08.1	49.156	0.028	0.468		17.792	9.108	1.226	22.181	0.02	0.008	99.99	锰钙铁辉石
JYB-08.2	49.046	0.001	0.185	0.016	15.23	13.804	0.065	21.548	0.029		99.92	锰钙铁辉石
NZB-279	50.864		1.06	0.083	32.268	3.662	1.921	9.422	0.072	0.047	99.4	阳起石
NZB279-3.1	48.853	-	0.63	0.116	33.726	4.567	7.774	1.37	0.057	0.035	97.13	锰阳起石
NZB279-3.2	49.258	0.004	0.957	-	31.946	3.63	9.684	1.611	0.074	0.068	97.23	锰阳起石
NZB279-3.3	46.242	-	0.699	0.086	36.728	3.934	7.948	1.311	0.06	0.06	97.07	锰阳起石
NZB279-3.4	46.924	0.001	0.606	0.208	35.419	4.149	8.103	1.241	0.077	0.049	96.78	锰阳起石
NZB279-3.5	48.778	-	0.982	0.125	33.226	4.031	8.355	1.569	0.09	0.081	97.24	锰阳起石
N608-5-2.2	48.536	-	0.141	0.025	21.605	7.705	20.71	0.681	0.013		99.42	富锰角闪石
N608-5-3.1	49.209	0.033	0.098	0.034	22.567	5.677	21.698	0.778	0.003		100.1	富锰角闪石
N0624-2.1	54.096	0.014	0.45	0.131	17.482	1.29	10.139	13.481	0.09	0.043	97.22	阳起石
N0624-2.2	54.03	-	0.507	0.115	15.487	0.78	11.083	14.53	0.093	0.067	96.69	阳起石
N0624-2.3	54.199	-	0.44	0.052	17.426	1.232	9.176	13.51	0.073	0.06	96.17	阳起石
N0624-2.4	55.528	0.031	0.539	0.046	15.485	1.024	10.683	13.471	0.153	0.06	97.02	阳起石
N622-5.1	52.11	-	0.278	0.044	24.52	1.221	11.248	7.716	0.05	0.075	97.26	阳起石
N622-5.2	52.149	0.002	0.181	-	25.612	1.507	11.178	6.906	0.038	0.019	97.59	阳起石
N622-5.3	52.364	-	0.343	0.027	24.269	1.365	11.131	8.301	0.053	0.074	97.93	阳起石
KUB-214-2	29.986	0.122	0.809	0.123	42.44	8.658	0.257	13.06	0	0	95.46	黑柱石
N608-8a-1.1	37.745	0.478	24.394	-	9.492	0.106	24.603	0.011			96.83	绿帘石
N608-8a-1.3	37.611	-	21.674	0.024	13.4	0.023	24.343	0.029			97.1	绿帘石
N608-8a-2.1	37.6	0.072	22.534	0.614	11.345	0.318	23.96		0.018		96.46	绿帘石
N608-8a-2.2	37.37	0.117	22.125	0.135	12.641	0.065	24.171	0.019	0.006	0.006	96.66	绿帘石

量为 29.99%, TiO₂ 含量为 0.12%, Al₂O₃ 含量为 0.81%, TFeO 含量为 42.44%, MnO 含量高达 8.66%, MgO 含量为 0.26%, CaO 含量为 13.06%(表 2)。其与前人研究的黑柱石电子分析结果基本一致(李加多等, 2019), 但本次黑柱石的 TFeO 含量稍低, 而 MnO 含量较高, 这可能是 Mn 置换了二价 Fe 离子的缘故。其属于锰黑柱石系列, 与矽卡岩型铅锌矿床黑柱石落入同一区域, 而与矽卡岩型金、锡矿床有所不同(图 9)。

4.2.4 闪石类

角闪石类矿物, 镜下特征, 牛苦头矿区阳起石常呈放射—纤维状, 镜下呈一级白或一级蓝干涉色(图 7-g, h)。常与黑柱石交代共生, 为退化变质作用阶段的产物。经电子探针分析测试, 角闪石 SiO₂ 含量为 48.54%~55.53%, TiO₂ 含量为 0.00~0.03%, Al₂O₃ 含量为 0.10%~0.98%, TFeO 含量为 15.49%~33.23%, MnO 含量为 0.78%~4.03%, MgO 含量为 8.36%~

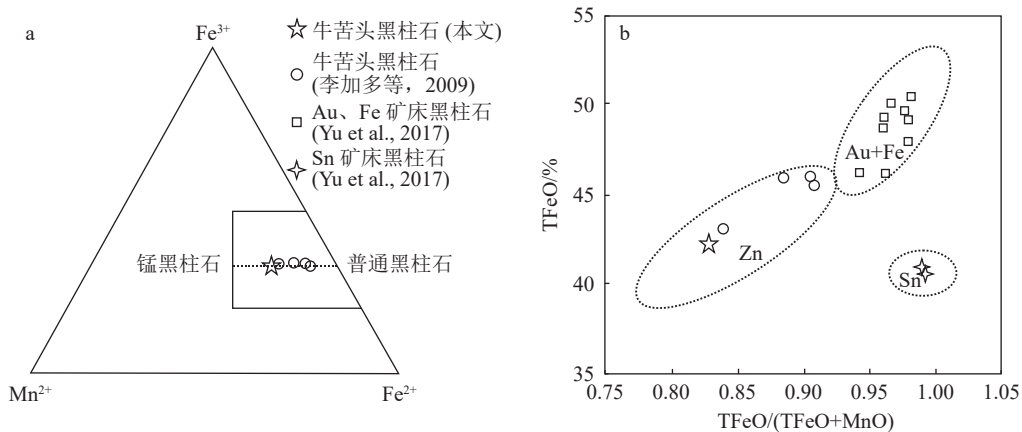


图9 黑柱石 Fe-Mn-Mg 分类图解(a)及 TFeO-TFeO/(TFeO+MnO) 成因图解

Fig. 9 Graphical classification of Fe-Mn-Mg (a) and TFeO vs. TFeO/(TFeO+MnO) genetic diagram (b) of ilvaite

21.70%, CaO 含量为 0.68%~14.53%。由角闪石分类图解可知(图 10), 牛苦头闪石类矿物主要成分属于阳起石与镁角闪石类, 少量为铁阳起石。但与一般闪石类矿物不同, 其 MnO 含量略有偏高。

4.2.5 绿帘石

绿帘石呈粒状—短柱状结构。单偏光下, 呈浅草黄色(图 7-i), 常与闪锌矿交代共生。正交光下, 具有异常干涉色。常交代早期矽卡岩矿物, 如石榴子石、透辉石等矿物, 表明其明显晚于早期矽卡岩矿物。电子探针结果显示, 绿帘石的主要成分为 SiO₂(37.37%~37.75%)、Al₂O₃(21.67%~24.39%)、CaO(23.96%~24.34%)及 TFeO(9.49%~13.40%)。

5 讨论

5.1 牛苦头矽卡岩矿床成矿成岩时代与成矿作用

有关牛苦头矿床成矿岩体的时代, 一直存在争

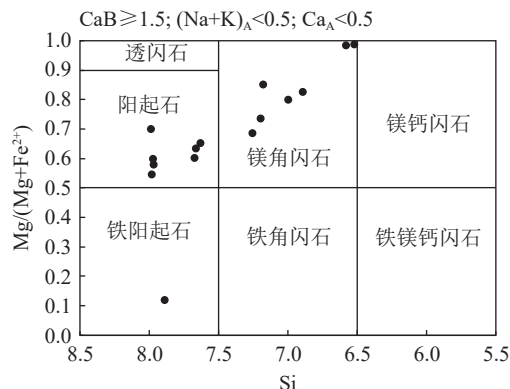


图 10 牛苦头矿床角闪石 Si-Mg/(Mg+Fe²⁺) 分类图解

Fig. 10 Mg/(Mg+Fe²⁺) vs. Si classification diagram of amphibole in Niukutou deposit

议。早先有学者认为其与周围大多数岩浆热液矿床一致, 属于印支期晚三叠世(毛景文等, 2012; 贾建团等, 2013; 蒋成伍等, 2013), 但尚未报道其精确的年龄数据, 随着牛苦头矿床研究工作的不断深入, 不断有学者认为牛苦头矿床成矿岩体侵入时代为中一晚泥盆世(姚磊等, 2016; 王新雨等, 2021)。牛苦头矽卡岩型矿床成矿岩体母岩早期经历了一系列演化与分异, 其成因复杂, 其形成于始特提斯洋闭合背景下, 岩石圈地幔物质底侵地壳导致下地壳部分熔融, 幔源岩浆与壳源岩浆混合形成的岩浆房, 经历分异演化, 形成最终成矿岩体, 其演化形成的含矿岩浆热液交代地层, 最终形成含矿矽卡岩(王新雨等, 2021; 耿健, 2023)。

牛苦头矿床成矿母岩为辉长闪长岩-闪长岩系列, 其经历了岩浆演化, 形成花岗闪长岩、石英闪长岩及最终的二长花岗岩系列。由图 4 可以看出, 矽卡岩围绕成矿二长花岗岩表现出明显的蚀变分带, 靠近二长花岗岩发育钙铁石榴石、钙铝榴石矽卡岩带, 对应的矿化为磁黄铁矿、黄铜矿化带, 为一套高温蚀变矿化组合; 远离二长花岗岩体发育锰钙铁辉石、含锰黑柱石、阳起石、绿帘石矽卡岩带, 对应的矿化为闪锌矿、方铅矿带, 为一套中低温蚀变矿化组合。这种蚀变矿化分带关系结合二长花岗岩发育明显的自蚀变特征(绢云母化、钾化、高岭土化), 暗示二长花岗岩是引起这些矽卡岩矿化的直接成矿岩体。

本次针对与矽卡岩时空关系密切的成矿二长花岗岩进行研究, 通过锆石 LA-ICP-MS 精细分析, 得出 18 个测量点的年龄加权平均值为 389.9±2.2 Ma, 属于中泥盆世。这与矿区黄铁矿闪锌矿矿石 Re-Os

等时线年龄(359.2 ± 6.3 Ma)基本一致(王新雨等, 2023)。结合前人研究工作, 本次研究再次直接证明, 牛苦头矿区存在华力西期重要的岩浆热液成矿活动。通过与区域上维宝矽卡岩型铅锌矿床、野马泉 M13 磁异常区铁锌矿段及四角羊部分铅锌矿段这些以铅锌为主的矿床的成矿岩体年龄对比(徐国端, 2010; 高永宝等, 2014; 宋忠宝等, 2014, 2016; 钟世华等, 2017a; 刘鹏等, 2020; 刘渭等, 2020), 再次指示了祁漫塔格地区华力西期泥盆纪岩浆侵入作用可能与铅锌矿床的形成密切相关。

5.2 矽卡岩形成的物理化学条件及其与矿化的关系

一般来说, 不同矿种的矽卡岩分带特征具有明显的区别, 例如, Meinert(2005)通过对世界 573 个铜矿的统计发现, 其矽卡岩蚀变特征大致表现为: 靠近成矿岩体为一套石榴子石、辉石矽卡岩带, 而远离岩体, 与大理岩接触带则出现符山石和硅灰石矽卡岩。矽卡岩型钨锡矿矽卡岩分带特征表现为(Meinert, 2005): 靠近成矿岩体为一套钙铁榴石、透辉石、方柱石矽卡岩, 远离成矿岩体发育铁铝榴石、绿帘石、粒硅镁石等矽卡岩矿物。矽卡岩型铅锌矿则表现出明显区别于矽卡岩型铜、钨锡矿床的矽卡岩分带特征, 由辽宁八家子铅锌矿床自成矿岩体至碳酸盐围岩, 矽卡岩分带表现为: 钙铁榴石、钙铁辉石矽卡岩带→黑柱石、锰钙铁辉石矽卡岩带→锰黑柱石钙蔷薇辉石矽卡岩带(赵一鸣等, 1990; Meinert, 2005)。本文通过对矿区 M1 矿床的研究发现, 自二长花岗岩向外, 矽卡岩分带依次表现为: 钙铁榴石、钙铝榴石带→钙铁辉石带→锰钙铁辉石、含锰黑柱石带→含锰阳起石、绿帘石带。对应的矿化分带依次为磁黄铁矿、黄铜矿带→磁黄铁矿、铁闪锌矿带→闪锌矿、方铅矿带→方铅矿带。基本与上述前人总结的矽卡岩型铅锌矿床蚀变分带特征一致。

靠近二长花岗岩岩体, 主要矿物组合为钙铁榴石、钙铝榴石带、钙铁辉石, 远离二长花岗岩岩体, MnO 含量升高, 主要矿物组合为锰钙铁辉石、含锰黑柱石, 再向外为含锰阳起石和绿帘石。这种 Mn 含量的变化是由于矽卡岩退变质矿物主要由进变质阶段矿物后期退化蚀变而形成的, 例如, 黑柱石便是由石榴子石和辉石经历了特定的物理化学条件蚀变形成的。在靠近二长花岗岩附近, 也存在少量退变质矿物阳起石、黑柱石、绿帘石等, 但其 MnO 含量低,

而外带的阳起石、黑柱石、绿帘石 MnO 含量高, 尤其在锰钙铁辉石矽卡岩里。这暗示着这些由进变质矿物后期蚀变而形成的矿物具有一定的继承性, 继承了进变质矿物的微量元素和高锰特征(王新雨等, 2020; Wang et al., 2023)。

根据前人的流体包裹体工作, 早期矽卡岩形成的温度为 $384 \sim 600^{\circ}\text{C}$, 晚期矽卡岩形成的温度为 $346 \sim 458^{\circ}\text{C}$, 石英硫化物阶段为 $133 \sim 433^{\circ}\text{C}$ (蒋斌斌等, 2021)。自成矿岩体向外, 成矿岩浆热液的 f_{O_2} 、温度、pH 值呈降低趋势(Wang et al., 2023)。结合蚀变分带特征, 可以判断, 矿区成矿热液是由西南至东北流动的。

成矿岩浆热液在早期矽卡岩阶段表现出较高的 f_{O_2} 和温度, 偏碱性, Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 离子络合物发生沉淀, 形成钙铁辉石和透辉石矿物组合, 并伴生磁黄铁矿、磁铁矿、黄铜矿化高温金属矿物组合。成矿热液运移到远端, 温度、 f_{O_2} 逐渐降低, 溶液逐渐偏酸性。此时, Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 络合物沉淀形成大量的锰钙铁榴石。溶液 pH 的变化导致 Al^{3+} 络合物沉淀, 使其赋存于钙铝榴石中。这与晚期钙铝榴石、锰钙铁辉石的组合一致。退变质矽卡岩阶段, 溶液 pH 值继续降低, 溶液还原性也增强, 导致 Pb、Zn 络合物分解, 在随后的石英硫化物阶段沉淀。

因此, 笔者认为成矿热液由西南至东北运移过程中物理化学条件发生变化, 形成了现今牛苦头铅锌矿床矽卡岩及矿化分带。早期富铁辉石、钙铁榴石形成于较高温度、氧逸度及 pH 环境下, 矿化以高温蚀变金属矿物组合为主, 铅锌矿化弱; 而晚期矽卡岩矿物组合锰钙铁辉石、含锰黑柱石、含锰阳起石等富锰矿物组合形成于较低的温度、氧逸度及 pH 环境下, 与铅锌矿化紧密相关。

5.3 祁漫塔格地区成矿时代与矽卡岩建造的关系

大量的研究表明, 祁漫塔格地区主要发育 3 种类型的矽卡岩, 即镁矽卡岩、钙矽卡岩和锰质矽卡岩; 钙、镁矽卡岩主要形成铁多金属矿床和铜多金属矿床, 而钙、锰质矽卡岩主要构成铅锌(银)矿床(丰成友等, 2012; 赵一鸣等, 2013; 高宏昶, 2021)。例如, 野马泉西矿段、尕林格矿区、迎庆沟矿区等发育锰质矽卡岩建造, 矿物组合以蛇纹石、透辉石、钙铁辉石、金云母为主(于森等, 2013; 马圣钞等, 2014; Yu et al., 2017), 主要矿石为磁铁矿和磁黄铁矿, 少量方铅矿和闪锌矿, 其成矿岩体及矿石时代均为印支期

晚三叠世(丰成友等, 2012)。有关泥盆纪成矿时代的矿床报道较少, 牛苦头矿区为典型的泥盆纪成矿的铅锌多金属矿床, 其矽卡岩建造为靠近成矿岩体的一套钙铁辉石、透辉石、钙铁榴石、钙铝榴石的钙质矽卡岩建造, 远离成矿岩体为一套含锰阳起石、锰质黑柱石、含锰角闪石、绿帘石的锰质矽卡岩建造, 其中远端矽卡岩中辉石中 MnO 含量高达 9.1%~13.8%, 黑柱石中锰含量高达 3.8%~8.7%, 因此, 牛苦头矿床系列属于钙、锰质矽卡岩系列, 其成矿时代为中—晚泥盆世。

将牛苦头矿床矽卡岩中的辉石与祁漫塔格地区典型矽卡岩铁矿床(野马泉)、矽卡岩型铜矿床(如卡尔却卡)、矽卡岩型铅锌矿床(维宝、四角羊)中的辉石对比后发现, 它们与矽卡岩铅锌矿中的辉石几乎落入同一范围内, 而与印支期矽卡岩型铁、铜多金属矿床相差甚远。这些特征均表明, 牛苦头矿床的矽卡岩建造具备铅锌矿化的条件。结合维宝、四角羊成矿岩体可能形成于中—晚泥盆世(钟世华, 2017b; 四角羊成矿岩体时代另文发表), 其矽卡岩建造也属于钙质、偏锰质矽卡岩建造(丰成友等, 2011; 赵一鸣等, 2013), 笔者认为, 祁漫塔格地区中—晚泥盆世岩浆岩的侵入可能是钙、锰质矽卡岩建造形成的主要原因。中—晚泥盆世岩浆岩侵入及与之相关的钙-锰质矽卡岩建造可作为该区域矽卡岩型铅锌矿床的找矿标志。

6 结 论

(1) 青海牛苦头铅锌矿床中, 与矽卡岩及矿化紧密相关的二长花岗岩侵入时代为 389.9 ± 2.2 Ma, 属于华力西期中泥盆世。

(2) 牛苦头矽卡岩属于钙-锰质矽卡岩建造, 自成矿岩体向外分带依次为钙铁辉石-钙铁榴石矽卡岩带、钙铁辉石-钙铝榴石矽卡岩带、含锰黑柱石-锰钙铁辉石矽卡岩带、含锰黑柱石-含锰阳起石-绿帘石矽卡岩带, 成矿热液自成矿岩体近端至远端(西南至东北)运移, 该过程中温度、 f_{O_2} 、pH 逐渐降低。矿化由近岩端的高温蚀变金属矿化组合到岩体远端的铅锌矿化组合转变, 成矿岩体远端富锰矽卡岩矿物组合与铅锌矿化密切相关。

(3) 祁漫塔格地区中—晚泥盆世岩浆岩及与之相关的钙-锰质矽卡岩建造可作为该区域矽卡岩型铅锌矿床的找矿标志。

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罗文成、王燕的大力支持; 锆石 LA-ICP-MS 技术得到广东拓岩检测技术有限公司杨毓波老师的帮助; 电子探针技术得到了中国地质科学院地质研究所电子探针实验室毛小红老师的悉心指导; 审稿专家对论文提出了许多宝贵的意见和建议, 向以上人员表示最衷心的感谢。

References

- Dong Y P, Hui B, Sun S S, et al. 2022. Multiple orogeny and geodynamics from Proto-Tethys to Paleo-Tethys of the Central China Orogenic Belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(10): 3426–3448 (in Chinese with English abstract).
- Feng C Y, Wang X P, Shu X F, et al. 2011. 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)*, 41(6): 1806–1817 (in Chinese with English abstract).
- Feng C Y, Wang S, Li G C, et al. 2012. Middle to Late Triassic granitoids in the Qimantage area, Qinghai Province, China: Chronology, geochemistry and metallogenic significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 665–678 (in Chinese with English abstract).
- Gao H X. 2021. Study on metallogenesis of endogenetic metal deposits in the Qimantag aera, East Kunlun, Qinghai Province [D]. Doctor Thesis of Jilin University: 1–261(in Chinese with English abstract).
- Gao Y B. 2013. The intermediate-acid intrusive magmasim and mineralization in Qimantag, East Kunlun Moutains [D]. Doctor Thesis of Chang'an University: 1–201(in Chinese with English abstract).
- Gao Y B, Li W Y, Qian B, et al. 2014. 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*, 30(6): 1647–1665(in Chinese with English abstract).
- Geng J. 2023. Study on magmatic rocks and mineralization of the second stage in Niukutou Mining area, Qinghai Province [D]. Master Thesis of China University of Geoscience: 1–79(in Chinese with English abstract).
- Jia J T. 2013. The study on characteristics of iron polymetallic deposit in Niukutou Qimantage distict Qinghai [D]. Master Thesis of China University of Geosciences: 1–39 (in Chinese with English abstract).
- Jiang B B, Zhu X Y, Wang X Y, et al. 2021. Metallogenic fluid characteristics of Niukutou lead zinc deposit in Qimantage area, Qinghai Province[J]. *Mineral Exploration*, 12(4): 944–952.
- Jiang C W. 2013. Mineralization characteristics of skarn type iron polymetallic&metallogenic model research in Sijiaoyang-Niukutou district in Qinghai province [D]. Master Thesis of China University of Geosciences: 1–35 (in Chinese with English abstract).
- Li J D, Wang X Y, Zhu X Y, et al. 2019. The preliminary discussion of the Hercynian metallogenic period in Qimantag area—with the example

- of Niukutou lead and zinc deposit[J]. *Mineral Exploration*, 10(8): 1775–1783 (in Chinese with English abstract).
- Liu P, Lu Z C, Dong S Y, et al. 2020. Fluid inclusion characteristics and metallogenic mechanism of Hutouya skarn Pb–Zn polymetallic deposit, Qimantag, Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 9(5): 825–844 (in Chinese with English abstract).
- Liu W, Yang X K, Jiang W, et al. 2021. Analysis of the tectonic stress field in Hutouya copper polymetallic ore field, Qimantag of East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 54(4): 100–112(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1/2): 34–43.
- Luo P, Wu J R, Zhang K, et al. 2023. The ore mineral typomorphic characteristics of minerals and its genetic significance in Niukutou deposit[J]. *Mineral Exploration*, 14(6): 880–888 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Zhou Z H, Feng C Y, et al. 2012. A preliminary study of the Triassic large-scale mineralization in China and its geodynamic setting[J]. *Geology in China*, 39(6): 1437–1471 (in Chinese with English abstract).
- Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S. 2005. World skarn deposits [J]. *Economic Geology*, 100th Anniversary Volume: 299–336.
- Slama J, Kosler J, Condon D J. 2008. Plesovice zircon—A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 249(1/2): 1–35.
- Song Z B, Zhang Y L, Jia Q Z, et al. 2014. U–Pb age of Yemaquan deep variscan granodiorite in Qimantag area, Eastern Kunlun and its significance[J]. *Geoscience*, 28(6): 1161–1169 (in Chinese with English abstract).
- Song Z B, Zhang Y L, Jia Q Z, et al. 2016. LA–ICPMS zircon U–Pb age of the Yemaquan granodiorite in the Qimantag area, Qinghai Province and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(12): 2006–2013 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Y, Wang S L, Zhang H Q, et al. 2023. Geochemical characteristics of the mineral assemblages from the Niukutou Pb–Zn skarn deposit, East Kunlun Mountains, and their metallogenic implications[J]. *Minerals*, 18: 1–25.
- Wang X Y, Wang S L, Wu J R, et al. 2023. Study on mineralization age and source ore forming of Niukutou Pb–Zn deposit, Qinghai Province: Evidence from geochronology of ore-forming rock bodies and Re–Os geochemistry of pyrite[J]. *Northwestern Geology*, 56(6): 71–77(in Chinese with English abstract).
- Wang X Y, Zhu X Y, Li J D, et al. 2021. Two stage magmatism and their skarn-type mineralization in the Niukutou ore district, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 1567–1586 (in Chinese with English abstract).
- Wang X Y, Zhu X Y, Li J D, et al. 2020. Genesis and geological significance of manganilvaite in the Niukutou deposit, Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2279–2290 (in Chinese with English abstract).
- Xu G D. 2010. Geology and geochemistry of typical deposits in Qimantag polymetallic mineralization belt, Qinghai Province [D]. Doctor Thesis of Kunming University of Science and Technology: 1–159 (in Chinese with English abstract).
- Yao L. 2015. Petrogenesis of the Triassic granitoids and skarn mineralization in the Qimantag area, Qinghai Province, and their geodynamic setting [D]. Doctor Thesis of China University of Geosciences Degree: 1–175 (in Chinese with English abstract).
- Yao L, Lu Z C, Zhao C S, et al. 2016. Geochronological study of granitoids from the Niukutou and B section of the Kaerqueka deposits, Qimantag area, Qinghai Province: Implications for Devonian magmatism and mineralization[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(7): 1158–1169.
- Yu M, Feng C Y, Mao J W, et al. 2017. The Qimantag Orogen as a window to the crustal evolution in northern Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Review*, 167: 103–123.
- Zhao Y M, Feng C Y, Li D X, et al. 2013. Metallogenic setting and mineralization–alteration characteristics of major skarn Fe–polymetallic deposits in Qimantag area, western Qinghai Province[J]. *Mineral Deposits*, 32(1): 1–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Y M, Lin W W, Bi C S, et al. 1990. Skarn deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1–354 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z Y. 2019. Study on skarn mineralogy and mineralization of the Niukutou Deposit, Qinghai Province[D]. Master Thesis of China University of Geoscience (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhong S H, Feng C Y, Li D X, et al. 2017a. Mineralogical characteristics of the Weixi ore block in the Weibao skarn-type copper–lead–zinc deposit, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(5): 1066–1082 (in Chinese with English abstract).
- Zhong S H, Feng C Y, Ren Y Q, et al. 2017b. Characteristics and sources of ore-forming fluid from Weixi ore block of Weibao skarn Cu–Pb–Zn deposit, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 36: 483–500 (in Chinese with English abstract).
- Zhong S H, Feng C Y, Selmann R, et al. 2018. 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*, 53(6): 855–870.

附中文参考文献

- 董小鹏, 惠博, 孙圣思, 等. 2022. 中国中央造山系原-古特提斯多阶段复合造山过程[J]. *地质学报*, 96(10): 3426–3448.
- 丰成友, 赵一鸣, 李大新, 等. 2011. 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*, 85(7): 1108–1115.
- 丰成友, 王松, 李国臣, 等. 2012. 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*, 8(2): 665–678.
- 高宏昶. 2021. 青海东昆仑祁漫塔格地区内生金属矿床成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文: 1–261.

- 高永宝. 2013. 东昆仑祁漫塔格地区中酸性侵入岩浆活动与成矿作用[D]. 长安大学博士学位论文: 1-201.
- 高永宝, 李文渊, 钱兵, 等. 2014. 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, 30(6): 1647-1665.
- 耿健. 2023. 青海牛苦头矿区两期岩浆岩与成矿研究[D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1-79.
- 贾建团. 2013. 青海祁漫塔格地区牛苦头铁多金属矿床地质特征研究[J]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1-39.
- 蒋斌斌, 祝新友, 王新雨, 等. 2021. 青海省祁漫塔格地区牛苦头铅锌矿成矿流体特征[J]. 矿产勘查, 12(4): 944-952.
- 蒋成伍. 2013. 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]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1-35.
- 李加多, 王新雨, 祝新友, 等. 2019. 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, 10(8): 1775-1783.
- 刘鹏, 吕志成, 董树义, 等. 2020. 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, 39(5): 825-844.
- 刘渭, 杨兴科, 江万, 等. 2021. 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, 54(4): 100-112.
- 罗攀, 吴锦荣, 张坤, 等. 2023. 牛苦头矿床矿石矿物标型特征及成因[J]. 矿产勘查, 14(6): 880-888.
- 毛景文, 周振华, 丰成友, 等. 2012. 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, 39(6): 1437-1471.
- 宋忠宝, 张雨莲, 贾群子, 等. 2014. 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, 28(6): 1161-1169.
- 宋忠宝, 张雨莲, 贾群子, 等. 2016. 青海祁漫塔格地区野马泉花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 35(12): 2006-2013.
- 王新雨, 祝新友, 李加多, 等. 2021. 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, 37(5): 1567-1586.
- 王新雨, 祝新友, 李加多, 等. 2020. 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, 94(8): 2279-2290.
- 王新雨, 王书来, 吴锦荣, 等. 2023. 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, 56(6): 71-81.
- 徐国端. 2010. 青海祁漫塔格多金属成矿带典型矿床地质地球化学研究[D]. 昆明理工大学博士学位论文: 1-159.
- 姚磊. 2015. 青海祁漫塔格地区三叠纪成岩成矿作用及地球动力学背景[D]. 中国地质大学(北京) 博士学位论文: 1-171.
- 姚磊, 吕志成, 赵财胜, 等. 2016. 青海祁漫塔格地区牛苦头矿床和卡而却卡矿床 B 区花岗质岩石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄——对泥盆纪成岩成矿作用的指示[J]. 地质通报, 35(7): 1158-1169.
- 于森, 丰成友, 保广英, 等. 2013. 青海杂林格铁矿床矽卡岩矿物学及蚀变分带[J]. 矿床地质, 32(1): 55-76.
- 赵一鸣, 丰成友, 李大新, 等. 2013. 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, 32(1): 1-19.
- 赵一鸣, 林文蔚, 毕承思, 等. 1990. 中国矽卡岩矿床[M]. 北京: 地质出版社: 1-354.
- 赵子烨. 2019. 青海牛苦头矽卡岩矿物学及成矿作用研究[D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文: 1-63.
- 钟世华, 丰成友, 李大新, 等. 2017a. 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, 91(5): 1066-1082.
- 钟世华, 丰成友, 任雅琼, 等. 2017b. 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, 36(2): 483-500.