



引文格式: 李来龙, 章永梅, 顾雪祥, 等. 新疆库尔尕生铅锌矿床成矿作用: 来自石英和闪锌矿原位微区成分的约束[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 139–153. DOI: 10.12401/j.nwg.2023174

Citation: LI Lailong, ZHANG Yongmei, GU Xuexiang, et al. Pb-Zn Mineralization in Kuergasheng Pb-Zn Deposit, Xinjiang: Constraints from In-situ Micro Composition of Quartz and Sphalerite[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 139–153. DOI: 10.12401/j.nwg.2023174

新疆库尔尕生铅锌矿床成矿作用: 来自石英和 闪锌矿原位微区成分的约束

李来龙¹, 章永梅^{1,2,*}, 顾雪祥^{1,2}, 柳晨雨³, 张英帅¹

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国石化江汉油田, 湖北 潜江 433100)

摘要: 库尔尕生铅锌矿床位于新疆西天山赛里木地区, 是一个形成于板内伸展环境中的热液脉型铅锌矿床。矿体呈脉状、网脉状以及透镜状赋存于上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组中, 并受控于 3 条近平行展布的 NW 向断裂带。成矿过程可分为无矿石英阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)(主成矿阶段)和方解石阶段(III) 3 个阶段。笔者利用 LA-ICP-MS 方法对不同成矿阶段石英和闪锌矿进行了原位微区分析。结果表明: ① 库尔尕生铅锌矿床 I 阶段和 II 阶段石英中含有多种微量元素, 主要富集 Al、K、Na 和 Li。Al、K、Na、Li 的质量分数分别为 $547.56 \times 10^{-6} \sim 4355.49 \times 10^{-6}$ 、 $9.41 \times 10^{-6} \sim 626.66 \times 10^{-6}$ 、 $23.78 \times 10^{-6} \sim 994.40 \times 10^{-6}$ 以及 $43.37 \times 10^{-6} \sim 265.52 \times 10^{-6}$, Al 与 Li+Na+K 之间呈显著的线性正相关关系; Ti、Ge 含量较低, 分别为 $3.17 \times 10^{-6} \sim 14.05 \times 10^{-6}$ 、 $1.77 \times 10^{-6} \sim 6.50 \times 10^{-6}$, 反映成矿温度较低。从 I 阶段到 II 阶段, 石英中 Ti 含量在逐渐降低, 指示成矿流体温度在逐渐降低; Al 含量也在降低, 反映成矿流体的 pH 值在逐渐升高。与世界典型的斑岩型和浅成低温热液型铅锌矿床相比, 库尔尕生铅锌矿床的石英微量元素特征更类似于浅成低温热液型矿床。② 闪锌矿中 Mn、In、Fe、Ga、Ge 等微量元素的含量和比值表明矿石形成于中低温环境, 进一步利用闪锌矿 GGIMFis 温度计限定成矿温度为 $122 \sim 178^{\circ}\text{C}$ 。Ga/In 值与 $\ln w(\text{Ga}) - \ln w(\text{In})$ 特征反映闪锌矿的形成与沉积作用有关。综合围岩地层的微量元素特征及前人 Pb 同位素研究, 推测库尔尕生铅锌矿床部分成矿物质来源于围岩地层。

关键词: 石英; 闪锌矿; 原位微区分析; 库尔尕生铅锌矿床; 新疆西天山

中图分类号: P618.42; P618.43 文献标志码: A 文章编号: 1009-6248(2024)03-0139-15

Pb-Zn Mineralization in Kuergasheng Pb-Zn Deposit, Xinjiang: Constraints from In-situ Micro Composition of Quartz and Sphalerite

LI Lailong¹, ZHANG Yongmei^{1,2,*}, GU Xuexiang^{1,2}, LIU Chenyu³, ZHANG Yingshuai¹

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-07-29; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130804), 国家重点研发计划深地资源勘查开采重点专项(2018YFC0604003), 大学生创新创业训练项目“新疆西天山阿希金矿床的石英结构和微区成分研究”(X202211415297)联合资助。

作者简介: 李来龙(2001-), 男, 本科生, 资源勘查工程(固体矿产)专业。E-mail: 2812638486@qq.com。

* 通讯作者: 章永梅(1984-), 女, 副教授, 博士生导师, 从事矿床学及矿床地球化学研究。E-mail: zhangyongmei@cugb.edu.cn。

- (1. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
3. Sinopec Jiangnan Oilfield, Qianjiang 433100, Hubei, China)

Abstract: The Kuergasheng Pb-Zn deposit, located in the Serimu area of the western Tianshan of Xinjiang, is a hydrothermal vein-type Pb-Zn deposit formed in the extensional environment of the plate. The ore body is veined, reticulated and lenticular in the upper subgroup of the Upper Devonian Toskurtau Formation, and is controlled by three north-west fault zones that are spread in parallel with each other. The mineralization process can be divided into three stages: the pre-ore quartz stage (I), the quartz-polymetallic sulphides stage (II) (main mineralization stage) and the calcite stage (III). In this study, the LA-ICP-MS method was used to analyze quartz and sphalerite at different stages of mineralization. The results showed that: (1) The Quartz in the I and II stages of the Kuergasheng Pb-Zn ore area contained more trace elements. Among them, Al, K, Na and Li are mainly enriched. The mass fractions of Al, K, Na and Li varied from $547.56 \times 10^{-6} \sim 4355.49 \times 10^{-6}$, $9.41 \times 10^{-6} \sim 626.66 \times 10^{-6}$, $23.78 \times 10^{-6} \sim 994.40 \times 10^{-6}$, and $43.37 \times 10^{-6} \sim 265.52 \times 10^{-6}$, respectively, showing a significant linear positive correlation between Al and Li+Na+K. The contents of Ti and Ge were low, and the contents of Ti and Ge varied from $3.17 \times 10^{-6} \sim 14.05 \times 10^{-6}$, and $1.77 \times 10^{-6} \sim 6.50 \times 10^{-6}$, respectively, reflecting the low mineralization temperature. Compared with the world's typical porphyry-type and epithermal Pb-Zn deposits, the quartz trace elements characteristics of the Kuergasheng Pb-Zn deposit are more similar to the epithermal Pb-Zn deposits. (2) The content and ratio of trace elements such as Mn, In, Fe, Ga, Ge in sphalerite indicate that the deposit was formed in a medium to low temperature environment, and the mineralization temperature was further limited to be $122 \sim 178$ °C by using sphalerite GGIMFis thermometer. The Ga/In ratio and $\ln w(\text{Ga}) - \ln w(\text{In})$ characteristics indicate that the formation of sphalerite is related to sedimentation. Combining the trace element characteristics of host rock with the previous Pb isotopic data, it is speculated that the ore-forming materials of the Kuergasheng Pb-Zn deposit were mainly derived from the host rock.

Keywords: quartz; sphalerite; in-situ microanalysis; Kuergasheng Pb-Zn deposit; western Tianshan, Xinjiang

新疆西天山赛里木微地块广泛发育着以 Cu、Mo、Pb、Zn 等金属为主的矿床。1985 年以来,赛里木地区陆续发现了达巴特铜钼矿床、库尔尕生铅锌矿床,以及乌兰布拉克、阿克塔西斯等众多铅锌矿点(新疆新地地质勘查有限公司, 2011)。前人主要针对达巴特铜钼矿床开展了地质特征、流体包裹体、稳定同位素地球化学和年代学等方面的研究,并确定该矿床为斑岩型铜钼矿床(王核等, 2000; 张作衡等, 2006, 2008, 2009; 唐功建等, 2008; 李野, 2012; 刘畅, 2015; Cao et al., 2020; 吕行, 2021)。库尔尕生铅锌矿床位于赛里木湖北东约 10 km 的库尔尕生布拉克沟口,北东距达巴特铜钼矿床约 10 km,北西距新沟铅锌矿床约 10 km (图 1b)。但有关库尔尕生等铅锌矿床(点)的研究却较为薄弱,段士刚等(2012)认为库尔尕生铅锌矿床可能是与斑岩有关的远源热液脉型矿床,成矿流体为岩

浆水与大气降水的混合水,成矿物质来源于斑岩与地层;伊其安等(2013)认为该矿床属层控热液型,围岩提供了成矿物质和成矿流体;柳晨雨等(2021)则指出该矿床为与邻近达巴特铜钼矿床伴生的、矿化相对较浅的远源中低温热液脉型矿床,与达巴特铜钼矿床构成一套与中酸性岩浆有关的斑岩型铜钼-热液脉型铅锌成矿系统,成矿物质来源于岩浆和地层。总体来说,库尔尕生属于热液脉型铅锌矿床,但其成矿物质和成矿流体来源还存有争议,关于成矿物理化学条件的研究也有待深化。

石英是各类金属矿床最为常见的脉石矿物,广泛分布于矿化的各个阶段,闪锌矿则是铅锌矿床中最主要的金属矿物,两种矿物中所含有的微量元素蕴含着丰富的成矿信息(Wang et al., 2010; Frenzel et al., 2016; Wei et al., 2019; 张天栋等, 2021)。目前,石英和闪锌

矿中的微量元素特征已被用于示踪成矿物质来源、限定成矿物理化学条件、指示矿床成因类型(陈小丹等, 2011; 郭飞等, 2020; Rottier et al., 2021; Gao et al., 2022)。笔者在查明库尔尕生铅锌矿床地质特征研究的基础上, 利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)对不同成矿阶段石英和闪锌矿进行了原位微区分析, 从而探讨成矿物质来源, 限定成矿温度, 综合分析成矿作用过程。

1 区域地质背景

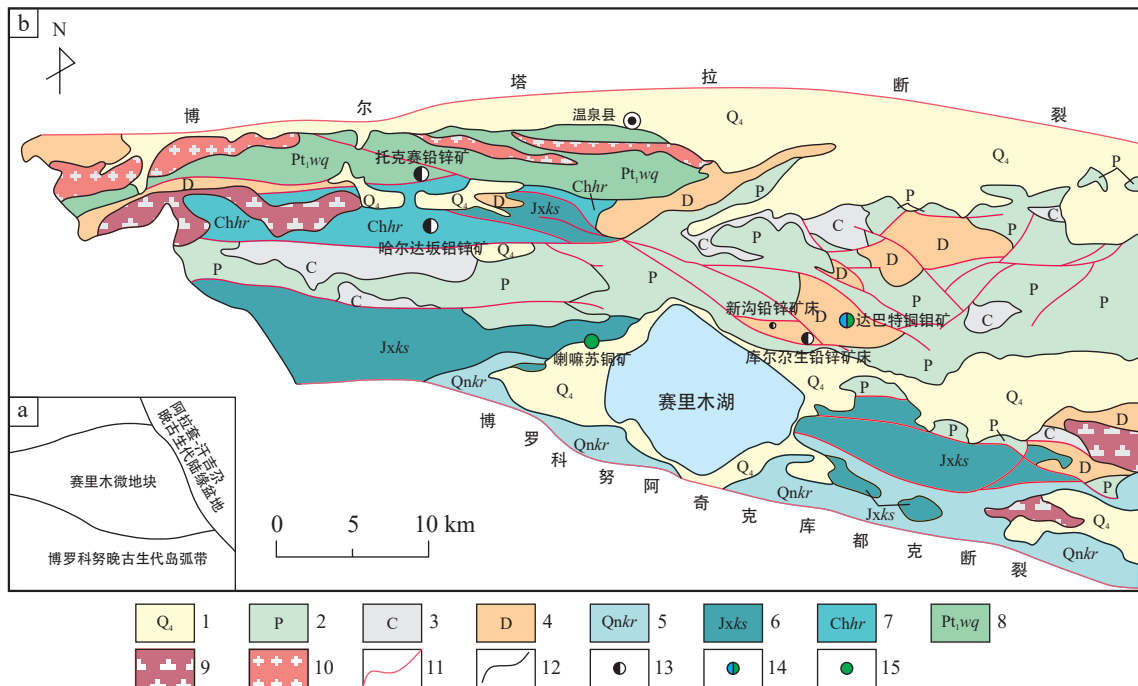
库尔尕生铅锌矿床位于新疆西天山地区, 在大地构造位置上处于由博尔塔拉大断裂、赛里木湖东北缘大断裂和博罗科努阿奇库都克大断裂所围限的赛里木微陆块, 其东北侧为阿拉套-汗吉尕晚古生代陆缘盆地, 南侧为博罗科努晚古生代岛弧带相隔(图1a)。

研究区主要出露元古宙变质基底与晚古生代盖层。元古宙变质基底由古元古界温泉群(Pt₁wq)、中元古界长城系哈尔达坂群(Chhr)、蓟县系库松木切克群(Jxks)以及新元古界青白口系凯尔塔斯群(Qnkr)组成, 晚古生代盖层包括中泥盆统汗吉尕组(D₂h)、上泥

盆统托斯库尔他乌组(D₃t)、下石炭统大哈拉山组(C₁d)和阿克沙克组(C₁a)、上石炭统东图津河组(C₂dt)和科古琴山组(C₂kg)以及下二叠统乌郎组(P₁w)和晓山萨依组(P₁xs)(图1b)。

区域褶皱构造发育, 其中规模较大的为轴部呈北西走向的近等轴状复式背斜——达巴特复背斜。该复背斜长为7~8 km, 宽为2~4 km, 由轴部向两翼, 依次分布中泥盆统汗吉尕组(D₂h)、上泥盆统托斯库尔他乌组(D₃t)、下石炭统阿克沙克组(C₁a)和下二叠统乌郎组(P₁w)。断裂构造主要表现为牙马特南山断裂、达巴特断裂、科克赛断裂、南达巴特断裂以及哈夏断裂等5条呈NW、NNW向展布的区域性断裂。

区域岩浆活动较为强烈, 主要集中于早元古代晚期和古生代, 集中分布于博尔塔拉断裂南侧及博罗科努山北坡断裂北东侧。岩体多呈EW向或近EW向展布, 与区域构造线走向一致。出露的岩体以酸性侵入岩为主, 呈岩基状分布, 少量为呈小岩株产出的碱性侵入岩。区内与侵入活动相伴生的火山活动比较活跃, 形成了较大面积的火山岩。火山活动始于长城纪, 到早二叠世结束, 其中早石炭世和早二叠世的火山活动最为强烈(薛春纪等, 2014, 2015)。



1.第四系沉积物; 2.二叠系; 3.石炭系; 4.泥盆系; 5.青白口系凯尔塔斯群; 6.蓟县系库松木切克群; 7.长城系哈尔达坂群; 8.古元古界温泉群; 9.古生代侵入岩; 10.元古宙侵入岩; 11.断层; 12.地质界线; 13.铅锌矿床; 14.铜铅矿床; 15.铜矿床

图1 新疆西天山赛里木地区大地构造位置图(a)和区域地质图(b)(据新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 2005; 顾雪祥等, 2013, 2014 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic location map and (b) regional geological map of Sailimu area, western Tianshan mountains, Xinjiang

2 矿床地质特征

库尔尕生铅锌矿床地层出露简单,包括上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组(D_3t^b)和第四系(Q_4)。托斯库尔他乌组上亚组(D_3t^b)出露最广,约占矿区面积的70%,按组成不同沉积韵律层内的主体岩层,大致可将其进一步划分成3个岩性段,均见有铅锌矿化。

下段(D_3t^{b-1}):为砂岩段,以灰褐色长石岩屑砂岩为主,夹黄褐色中细粒砂岩及泥质粉砂岩薄层。该岩性段出露范围小,仅在新沟-库尔尕生布拉克背斜的核部局部被剥蚀出露。

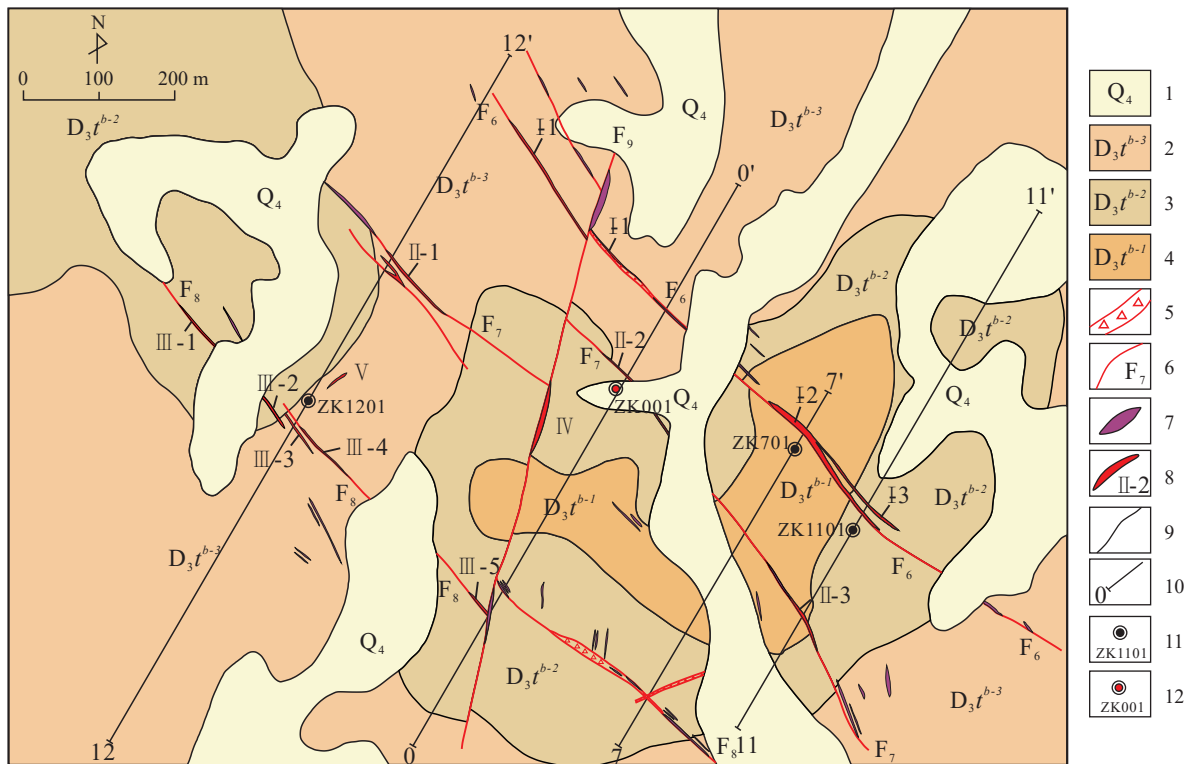
中段(D_3t^{b-2}):为粉砂岩段,以青灰色泥质粉砂岩为主,一般呈中-薄层状,偶夹灰-灰褐色细砂岩薄层,水平层理发育。地表及浅部由于风化作用,岩石常沿层理面碎裂成薄片。

上段(D_3t^{b-3}):为砂岩夹粉砂岩段,下部以灰褐色长石质岩屑砂岩为主,并局部见有分选、磨圆度均较好的细砾岩层;上部为粉砂岩与砂岩的互层,一般单

层厚度小于20 cm。该岩性段主要出露于矿区南北两侧,分布面积较广,占据矿区大部分地区。

矿区的构造主要为新沟-库尔尕生布拉克背斜,该背斜总体轴向为NW,长约为13 km,宽约为4 km(伊其安等,2013),并可进一步划分为3个次级小型复式褶皱。南部由一个背斜和一个向斜组成,两个褶皱均属紧闭型褶皱,规模较小;北部背斜较宽缓,岩层向四周缓倾,呈穹隆状。库尔尕生铅锌矿床主要产于北部背斜的核部及附近。矿区断裂构造较发育,按走向可划分为NW向和NNE向两组。这些断裂与背斜同期形成,集中分布在背斜的核部一带(图2)。

依据断裂构造的控矿特征,自北往南分为3个矿带,大小矿体共10余条。矿体呈脉状、网脉状、透镜状赋存于上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组泥质粉砂岩、岩屑砂岩和长石岩屑砂岩中,并且受3条近于平行排列的北西向断裂带(F_6 、 F_7 、 F_8)控制。在平面上呈NW向平行排列,断续分布,剖面上延伸较稳定,且有厚度变大、品位变富的趋势。矿体分布于 F_6 和 F_8 南北两条断裂所夹持的区域,形成了宽约为430 m、长



1. 第四系; 2. 上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组上段; 3. 上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组中段; 4. 上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组下段; 5. 断层破碎带; 6. 断层及编号; 7. 石英脉; 8. 矿体及编号; 9. 地质界线; 10. 实测剖面位置及编号; 11. 钻孔位置及编号; 12. 采样钻孔位置及编号

图2 库尔尕生铅锌矿床地质简图(据戴玉林, 1994; 刘凤鸣, 2007 修改)

Fig. 2 Geological map of Kuergasheng Pb-Zn deposit

约为 1.1 km、呈 NW 向展布的矿化集中区。

I 矿带受 F_6 断裂控制, 长约为 1 100 m, 地表出露有 3 条矿体: I-1 号矿体, 地表长为 296 m, 平均厚为 1.37 m, 形态为脉状, 走向为 $315^\circ\sim 340^\circ$, 倾向 SW; 西段倾角较缓, 约为 $50^\circ\sim 60^\circ$; 东段变陡, 达 $72^\circ\sim 78^\circ$, 矿体形态为脉状, 围岩为灰色中细粒长石岩屑砂岩。I-2 号

矿体为矿区规模最大的一条矿体, 矿体形态为脉状, 矿体长为 240 m, 平均厚为 5.05 m, 矿脉走向为 315° , 倾向 SW, 倾角为 $76^\circ\sim 81^\circ$ (图 3), 矿体围岩有砂岩、岩屑砂岩和泥质粉砂岩。I-3 号矿体, 属 I-2 的分支矿体, 矿体实际控制长度为 60 m, 平均宽为 1.38 m, 脉状产出, 矿体走向为 315° , 倾向 NE, 倾角为 $70^\circ\sim 85^\circ$, 围岩为粉砂岩。

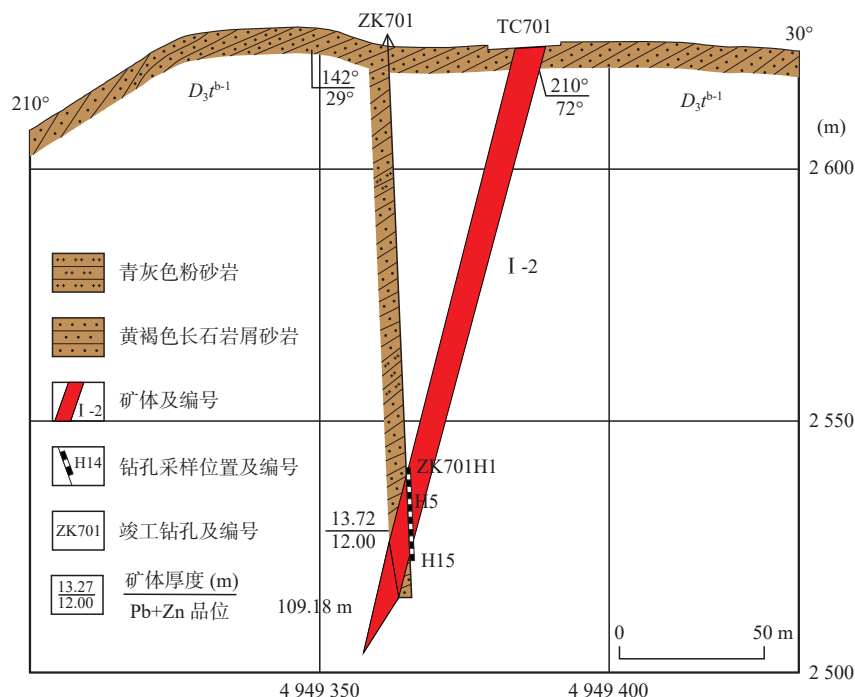


图3 库尔杂生矿床 I-2 号矿体 7 号勘探线剖面图(据新疆有色地质矿产勘查院, 2002 修改)

Fig. 3 Profile view of exploration line No. 7 of the I-2 ore body of the Kuergasheng ore section

II 矿带受断裂 F_7 控制, 长约为 800 m, 分布有 4 条矿体。II-1 和 II-2 号矿体, 矿体呈脉状、透镜状, 长分别为 110 m、56 m, 平均厚分别为 2 m、1.2 m, 具分支复合特征, 走向为 $300^\circ\sim 320^\circ$, 倾向 SW, 倾角为 $70^\circ\sim 80^\circ$, 围岩为灰-灰褐色长石质岩屑砂岩。II-3 号矿体, 东段为第四系覆盖, 出露长度约为 150 m, 平均厚为 1 m, 走向为 $320^\circ\sim 330^\circ$, 倾向 SW, 倾角为 88° , 矿体围岩为砂岩、粉砂岩。II-4 号矿体, 地表出露长度约为 66 m, 平均宽为 1 m, 走向为 $330^\circ\sim 340^\circ$, 倾向 NNE, 倾角约为 75° , 围岩为砂岩、粉砂岩。

III 矿带受断裂 F_8 控制, 长约为 1 000 m。沿断裂分布有 5 条矿体。矿体规模均较小, 延伸不稳定, 一般长约为 30 m, 平均宽为 2 m, 形态为脉状、网脉状和透镜状, 呈左行雁列式排列。总体走向为 $310^\circ\sim 320^\circ$, 倾向 NE, 倾角为 $55^\circ\sim 65^\circ$ 。矿体围岩西段为长石岩屑砂岩、东段为粉砂岩。

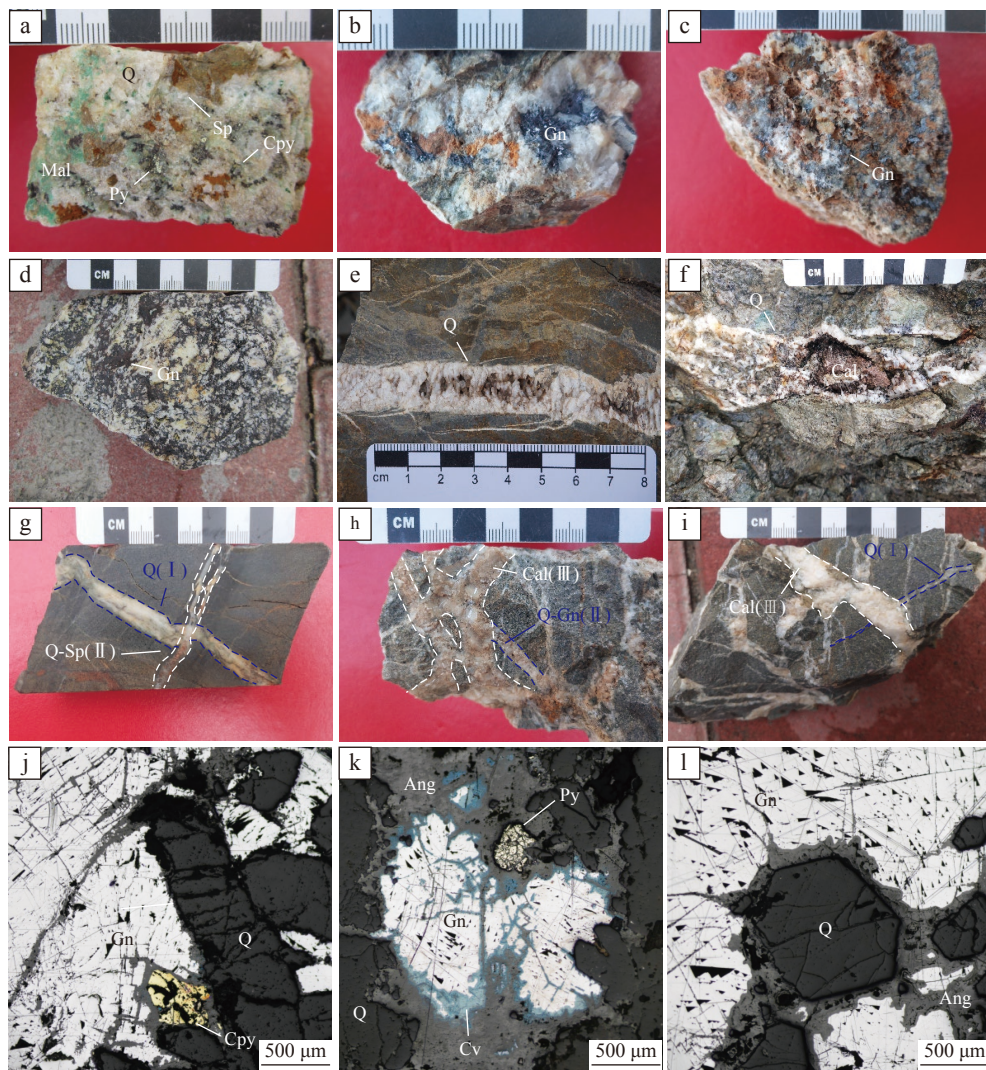
矿床主矿种为铅和锌, 伴生有益组分包括铜、银、金等。矿区铅锌矿化强度不均, 品位变化较大, 以 I-2 矿体规模大, 品质好(图 3)。总体看东段优于西段, 深部优于地表; 同一地段也有贫、富之分, 其中富矿主要集中在矿体中部的网脉状或粗脉状石英中, 平均厚为 0.7 m, 深部可达 2 m 以上, 富矿部位可见方铅矿呈脉状或块状产于石英网脉中, 品位最高达 45% 以上, 一般约为 20%。估算铅、锌推断资源量分别为 3.6 万 t、6.1 万 t(肖红等, 2002)。

矿石中金属矿物主要为方铅矿和闪锌矿, 可见少量黄铜矿和黄铁矿, 非金属矿物主要为石英和方解石, 次生矿物可见铜蓝、孔雀石和少量铅矾(图 4a、图 4j~图 4l)。矿石构造以浸染状构造为主, 次为块状、团块状、蜂窝状、梳状以及晶洞状构造(图 4b~图 4f)。矿石结构主要包括自形粒状结构(常见于方铅矿、闪锌矿、石英和方解石中, 自形程度较好且结

晶粗大)、半自形粒状结构(常见于黄铜矿和黄铁矿中,且粒径不大)、他形粒状结构(常见于次生矿物中)。围岩蚀变较弱,主要包括硅化、硫化物化以碳酸盐化。

根据矿石中脉体之间的穿插关系及矿物组合,将成矿过程划分为无矿石英阶段(I)、石英-多金属硫化物阶段(II)以及方解石阶段(III)3个阶段。I阶段只发育白色石英,且自形程度良好,结晶粗大。II阶段为主成矿阶段,主要矿物为石英、闪锌矿和方解石,

可见少量的黄铁矿和黄铜矿。石英自形程度良好,结晶粗大,常沿裂隙呈细脉或网脉状产出。闪锌矿和方铅矿自形程度较好,常与石英呈脉状或网脉状产出。黄铁矿和黄铜矿与闪锌矿和方铅矿共生,与石英呈脉状产出,呈半自形-他形分布于方铅矿和石英的间隙间(图4j、图4k)。可见石英-闪锌矿脉穿切无矿石英脉(图4g)。III阶段只发育自形程度良好、粒径粗大的方解石,常沿裂隙呈脉状产出,但脉体中未见矿化。可见方解石脉穿切石英-方铅矿脉(图4h),也可见方解



a. 稀疏浸染状矿石中共生的石英、方铅矿、黄铜矿和黄铁矿,矿石表面氧化形成孔雀石; b. 团块状方铅矿矿石; c. 蜂窝状方铅矿矿石; d. 稠密浸染状方铅矿矿石; e. 梳状石英脉; f. 晶洞状石英中充填方解石; g. 石英-闪锌矿脉(II)切穿石英脉(I); h. 方解石脉(III)切穿石英-方铅矿脉(II); i. 方解石脉(III)切穿石英脉(I); j. 方铅矿、黄铜矿与石英共生; k. 铅矾和铜蓝沿方铅矿自身裂隙交代方铅矿; l. 铅矾沿方铅矿和石英间隙交代方铅矿; j~l 为反射单偏光下拍摄; Sp. 闪锌矿; Q. 石英; Py. 黄铁矿; Cpy. 黄铜矿; Mal. 孔雀石; Gn. 方铅矿; Cal. 方解石; Cv. 铜蓝; Ang. 铅矾

图4 库尔杂生铅锌矿床矿石构造、脉体穿插关系与矿物组合

Fig. 4 Ore structure, vein interspersed relationship and mineral assemblage of Pb-Zn deposit in Kurkasheng

石英脉切无石英英脉(图 4i), 局部可见方解石充填在石英晶洞中(图 4f)。

3 样品采集与分析方法

本次测试研究的样品采自库尔尕生矿床地表及钻孔 ZK001 岩心, 采样深度为 60~90 m。利用 LA-ICP-MS 对不同成矿阶段石英和闪锌矿开展了微量元素分析测试。

石英微量元素分析在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室完成。激光剥蚀系统为美国 Geolas 193 准分子固体进样系统和 X Series II 型等离子体质谱联用。激光束斑直径为 60 μm , 频率为 6 Hz, 能量密度为 12 J/cm²。载气为氦气, 通过 T 型连接头将氦气与载气混合进入 ICP-MS 中。每个样品的数据采集时间共 100 s, 其中前 20 s 为气体背景采集时间, 采用标准玻璃 NIST610 作为外标, 石英中 Si 元素理论值作为内标进行微量元素校正, 一个天然石英标样 Q7(Audétat et al., 2015)作为监控样, 以确保数据的准确性。测试完成后, 离线数据处理采用软件 ICPMSDataCal 完成(Liu et al., 2010)。

闪锌矿微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。激光剥蚀系统为 ASI 公司 RESOLUTION-LR-S155 准分子激光器, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)为 Agilent7700x。激光频率为 5 Hz, 能量为 2.5~3 J/cm², 束斑直径为 26 μm 。激光剥蚀过程中采用氦气作载气, 由一个 T 型接头将氦气和氦气混合后进入 ICP-MS 中。每个采集周期包括大约 30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。含量计算采用多外标、总量归一化法(Liu et al., 2008; 刘勇胜等, 2013)。

4 测试结果

4.1 石英微区成分

库尔尕生铅锌矿床 I、II 阶段石英微量元素测试结果表明, 石英中 Al 质量分数为 $547.56 \times 10^{-6} \sim 4355.49 \times 10^{-6}$, K 质量分数为 $9.41 \times 10^{-6} \sim 626.66 \times 10^{-6}$, Na 质量分数为 $23.78 \times 10^{-6} \sim 994.40 \times 10^{-6}$, Li 质量分数为 $43.37 \times 10^{-6} \sim 265.52 \times 10^{-6}$, Ti 质量分数为 $3.17 \times 10^{-6} \sim 14.05 \times 10^{-6}$, Ge 质量分数为 $1.77 \times 10^{-6} \sim 6.50 \times 10^{-6}$ (表 1)。由于

石英脉中的流体包裹体通常含有大量 Na、K、Mn、Fe、Sr、Pb 等元素, 但几乎不含 Li、Al、Ti 和 Ge(Maydagán et al., 2015)。因此, 为了避免流体包裹体对实验结果的影响, 笔者仅对石英中 Li、Al、Ti 和 Ge 含量进行分析作图(图 5、图 6)。I 阶段石英富 Li 和 Al, 贫 Ti 和 Ge, 微量元素变化范围较为集中, 各种元素之间无明显的相关性; II 阶段石英微量元素含量变化范围较大, 但 Al 和 Li、Li 和 Ge 之间呈现出相对显著的正相关关系(图 6d、图 6f); 从 I 阶段到 II 阶段, Li、Al、Ti 和 Ge 含量均呈现下降趋势。

4.2 闪锌矿微区成分

库尔尕生矿床闪锌矿中微量元素分析结果见表 2。闪锌矿中 Fe 质量分数为 1.18%~1.72%, Zn 质量分数为 52.38%~69.45%, Se 质量分数变化范围比较大; Mn、In 含量相对较小, 变化范围分别为 $11.95 \times 10^{-6} \sim 45.76 \times 10^{-6}$ 与 $3.43 \times 10^{-6} \sim 24.23 \times 10^{-6}$; Ga 含量为 $18.78 \times 10^{-6} \sim 334.85 \times 10^{-6}$, 平均值为 190.83×10^{-6} , Ge 含量为 $13.62 \times 10^{-6} \sim 55.16 \times 10^{-6}$ 。

5 讨论

5.1 石英微区成分分析

石英是地壳中丰富而重要的矿物, 广泛存在于各种地质环境中。由于石英具有稳定的化学性质和晶体结构, 在地质演化过程中可以保存成矿作用的基本信息, 同时石英中微量元素的变化与石英的生长速率及其所处的物理化学环境密切相关, 是揭示其物理化学条件的理想示踪矿物。作为岩浆-热液和热液矿床中的主要脉石矿物, 其微量元素丰度和分布已越来越多地用于指示矿床成因分类和重建石英形成过程中的物理化学条件(Wang et al., 2021)。

5.1.1 石英中微量元素的赋存状态

已有研究表明, Al、B、Ge、Fe、H、K、Li、Na、P 和 Ti 等是进入石英晶格中最常见的微量元素(Flem et al., 2002; Wark et al., 2006; Hayden et al., 2008)。这些元素进入石英中的形式主要有 3 种: ①单个原子形式, 如 Ti^{4+} 、 Ga^{4+} 、 Ge^{4+} 和 Sn^{4+} 等可以类质同象形式替代石英晶格中的 Si^{4+} (Götze et al., 2004; Larsen et al., 2004)。②原子团形式, 如 Al^{3+} 和 P^{5+} 可以与相邻的两个 Si^{4+} 同时进行替代(Larsen et al., 2004)。③电荷补偿替代, 如 B^{3+} 、 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Ga^{3+} 、 As^{3+} 等与碱金属离子(Li^{+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 等)一起进入石英晶格间隙中(Götze et al., 2004; Ja-

表 1 库尔尕生铅锌矿床石英微量元素组成表(10⁻⁶)

Tab. 1 Trace elements composition of quartz in Kuergasheng Pb-Zn deposit (10⁻⁶)

成矿阶段	样品号	Li	Na	Al	P	K	Ca	Ti	Fe	Ge	Rb	Sr	Sb	Ba
I 阶段	19KE001-17-1	183	428	3567	10.9	446	318	9.33	18.4	3.66	2.08	5.82	11.9	14.4
	19KE001-17-2	161	408	3053	28.0	433	370	8.05	22.1	3.66	1.60	4.25	10.6	8.78
	19KE001-17-3	194	469	3743	31.8	627	456	9.26	12.7	3.72	1.65	3.92	12.2	9.31
	19KE001-17-4	224	635	3874	34.8	436	497	14.0	83.1	4.18	1.89	3.36	9.41	9.16
	19KE001-17-5	209	455	3547	45.4	404	341	8.63	14.1	4.08	1.65	4.76	10.4	11.1
	19KE001-17-6	232	368	3528	37.6	355	803	7.18	22.3	4.58	1.43	3.97	10.5	9.81
	19KE001-17-7	196	263	3741	36.4	520	708	10.3	65.5	4.41	2.68	2.34	11.1	6.21
	19KE001-17-8	158	683	2993	44.8	468	566	8.84	15.0	4.99	1.17	3.92	11.0	7.57
	19KE001-17-9	212	451	3148	67.1	529	414	9.59	51.5	5.50	1.85	4.02	8.28	8.16
	19KE001-17-10	197	387	2933	9.80	239	732	8.86	14.5	4.43	0.57	2.01	9.84	3.95
	19KE001-17-11	181	389	2872	35.6	285	467	8.20	8.20	4.77	1.27	3.94	10.0	8.85
	19KE001-17-12	118	473	2876	30.8	393	478	9.77	4.65	6.49	0.72	2.36	9.79	4.37
	19KE001-17-13	144	337	2288	36.9	487	468	6.21	53.8	4.11	1.62	3.23	4.20	5.61
	19KE001-17-14	172	365	2544	35.8	341	801	8.80	41.4	5.38	0.87	2.27	5.57	3.98
	19KE001-17-15	121	228	1897	46.9	112	787	6.14	2.76	3.81	0.38	1.98	5.67	4.73
II 阶段	19KE001-17-16	108	356	1972	30.9	202	524	5.74	9.06	3.85	0.71	2.78	6.83	7.37
	19KE001-19-1	149	136	1488	42.6	62.1	821	4.25	55.1	2.95	0.26	1.41	2.87	3.13
	19KE001-19-2	119	131	1241	20.5	48.5	633	6.10	30.1	3.17	0.23	1.08	3.92	4.13
	19KE001-19-3	43.4	60.1	548	9.74	15.1	686	3.45	4.21	2.47	0.02	0.46	0.93	1.16
	19KE001-19-4	220	136	2471	43.6	104	693	6.44	4.48	4.87	0.28	0.72	6.34	1.86
	19KE001-19-5	136	151	1605	31.4	136	761	6.71	289	4.21	0.64	1.65	3.53	4.93
	19KE001-19-6	83.0	299	1567	22.6	99.8	930	3.93	4.88	2.78	0.40	1.88	3.53	3.77
	19KE001-19-7	207	297	2600	40.1	164	627	7.89	1.88	6.50	0.52	2.11	8.00	4.90
	19KE001-19-8	103	106	1233	20.6	41.3	721	11.1	124	3.53	0.17	1.18	2.97	2.49
	19KE001-19-9	186	196	2289	33.9	152	873	10.6	275	5.10	0.73	1.46	7.44	3.94
	19KE001-19-10	113	47.8	1454	48.3	10.8	672	3.84	13.5	4.05	0.03	0.26	4.23	0.69
	19KE001-19-11	51.5	42.9	665	10.9	26.3	834	3.45	95.5	2.79	0.02	0.29	1.51	1.06
	19KE001-19-12	87.3	23.8	1132	18.1	9.41	941	7.46	291	4.09	0.06	0.23	2.13	0.65
	19KE001-19-13	76.8	55.9	897	22.3	21.7	863	3.17	461	2.72	0.06	0.72	2.48	2.18
	19KE-4-1	266	994	4239	12.4	47.4	655	8.54	1.34	5.72	0.18	11.7	17.3	9.98
	19KE-4-2	181	589	3142	27.8	106	906	8.57	0.72	4.12	0.63	6.51	12.6	12.2
	19KE-4-3	116	914	4355	0.84	391	705	10.8	402	4.07	0.70	7.83	18.3	13.3
	19KE-4-4	102	293	2198	45.9	355	727	3.89	23.3	2.37	1.12	13.0	6.84	13.8
	19KE-4-5	209	432	3363	34.9	121	661	9.03	16.3	4.73	0.52	8.03	10.0	4.95
	19KE-4-6	88.6	985	3113	22.6	137	793	10.2	6.36	4.06	0.52	3.62	9.18	5.52
	19KE-4-7	147	296	2319	67.5	113	489	10.4	2.18	3.43	0.40	3.06	7.85	6.74
	19KE-4-8	99.0	751	2409	17.7	83.6	779	7.24	14.2	4.64	0.38	11.2	7.54	9.89
	19KE-4-9	62.0	247	1460	59.3	247	483	3.51	19.8	1.83	1.05	4.97	3.10	9.14
	19KE-4-10	121	327	2678	33.8	352	851	4.43	36.9	2.71	1.27	7.00	13.1	13.5
	19KE-4-11	77.3	254	1553	57.0	197	538	4.71	8.14	1.77	0.70	5.41	7.07	9.24
	19KE-4-12	105	542	2195	35.0	303	440	4.53	19.1	2.79	0.96	9.92	11.0	15.3
	19KE-4-13	50.9	357	2032	52.3	573	755	5.09	93.6	2.32	2.62	8.87	5.19	11.0

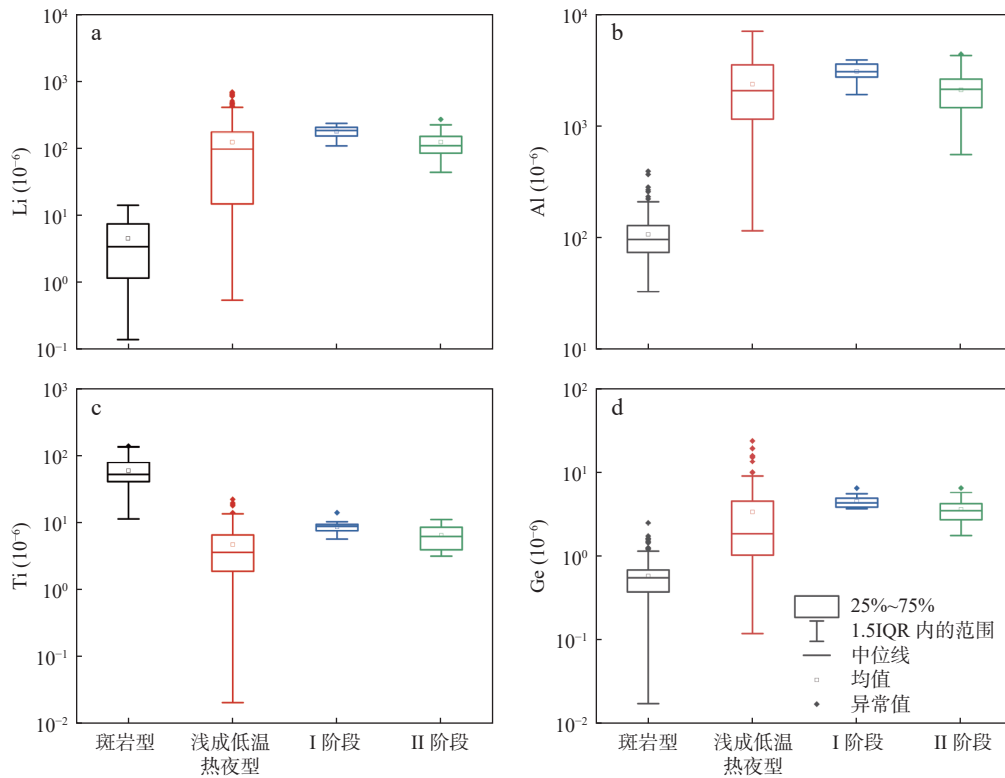


图5 浅成低温热液型、斑岩型铅锌矿床和库尔尕生铅锌矿床石英 Li、Al、Ti 和 Ge 元素对比
(斑岩型和浅成低温热液型铅锌矿床石英微量数据源自 Gao et al., 2022)

Fig. 5 Comparison of Li, Al, Ti and Ge elements in quartz of epithermal type, porphyry type Pb-Zn deposits and Kuergasheng Pb-Zn deposit

camon et al., 2009)。在第三种机制下, 热液石英中 Al 与 Na、Li、K 呈现出显著的正相关性 (Götte et al., 2012)。分析结果显示, Al 与 Li+Na+K 质量分数之间具有明显的正相关关系 ($r^2=0.80$) (图 7), 表明 Al^{3+} 与 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 共同替代石英中的 Si^{4+} 。

5.1.2 石英微量元素对成矿条件及矿床类型的指示

高温热液矿床中的微量元素主要表现为 Ti 的富集, 而低温热液矿床中一般不含 Ti、Ge、Mg 或者含量较低 (Rusk et al., 2008)。库尔尕生铅锌矿床石英具有低的 Ti、Ge 含量, 表明成矿流体的温度较低。从 I 阶段到 II 阶段, 石英中 Ti、Ge 含量具有降低的趋势 (图 5), 反映了 I 阶段到 II 阶段成矿流体温度有所降低, 这与流体包裹体测温结果一致 (柳晨雨等, 2021)。此外, 热液石英中 Al 含量与溶液 pH 值也有强烈相关关系 (陈小丹等, 2011)。从 I 阶段到 II 阶段, 石英 Al 的含量也逐渐降低, 反映成矿流体 pH 的升高。因此, 温度降低、pH 升高可能是库尔尕生铅锌矿床主成矿阶段金属沉淀的机制。在微量元素二元图解中 (图 6), 数据点整体上均分布于浅成低温热液矿床的范围内,

表明库尔尕生铅锌矿床为矿化深度较浅的中低温热液脉型矿床。

5.2 闪锌矿微区成分分析

5.2.1 闪锌矿微量元素组成对成矿温度的指示

闪锌矿微量元素的组成特征与其形成的温度密切相关, 能客观反映成矿温度的高低。研究表明, 高温条件下形成的闪锌矿富集 Fe、Mn、In、Se 和 Te 等元素, 而低温条件下形成闪锌矿则相对富集 Cd、Ga、Ge 等元素 (刘英俊等, 1984; 韩照信, 1994; 蔡劲宏等, 1996), 库尔尕生铅锌矿床闪锌矿中 Fe 含量为 1.18%~1.72%, 平均值为 1.44%, 远小于 10% (张辉善等, 2018), 不属于高温铁闪锌矿。Mn ($11.95 \times 10^{-6} \sim 45.76 \times 10^{-6}$)、In ($3.43 \times 10^{-6} \sim 24.23 \times 10^{-6}$) 含量相对较小, 且 Ga ($18.78 \times 10^{-6} \sim 334.85 \times 10^{-6}$, 平均值为 190.83×10^{-6})、Ge ($13.62 \times 10^{-6} \sim 55.16 \times 10^{-6}$) 相对富集, 可以反映出成矿温度属于中低温 (郭闯等, 2023)。前人研究发现, 从高温→中温→低温成矿条件, 闪锌矿的 Ge 含量依次增高, 高温闪锌矿 Ge 含量一般 $< 5.00 \times 10^{-6}$, 中温闪锌矿 Ge 含量为 $5.00 \times 10^{-6} \sim 50.00 \times 10^{-6}$, 低温闪锌矿

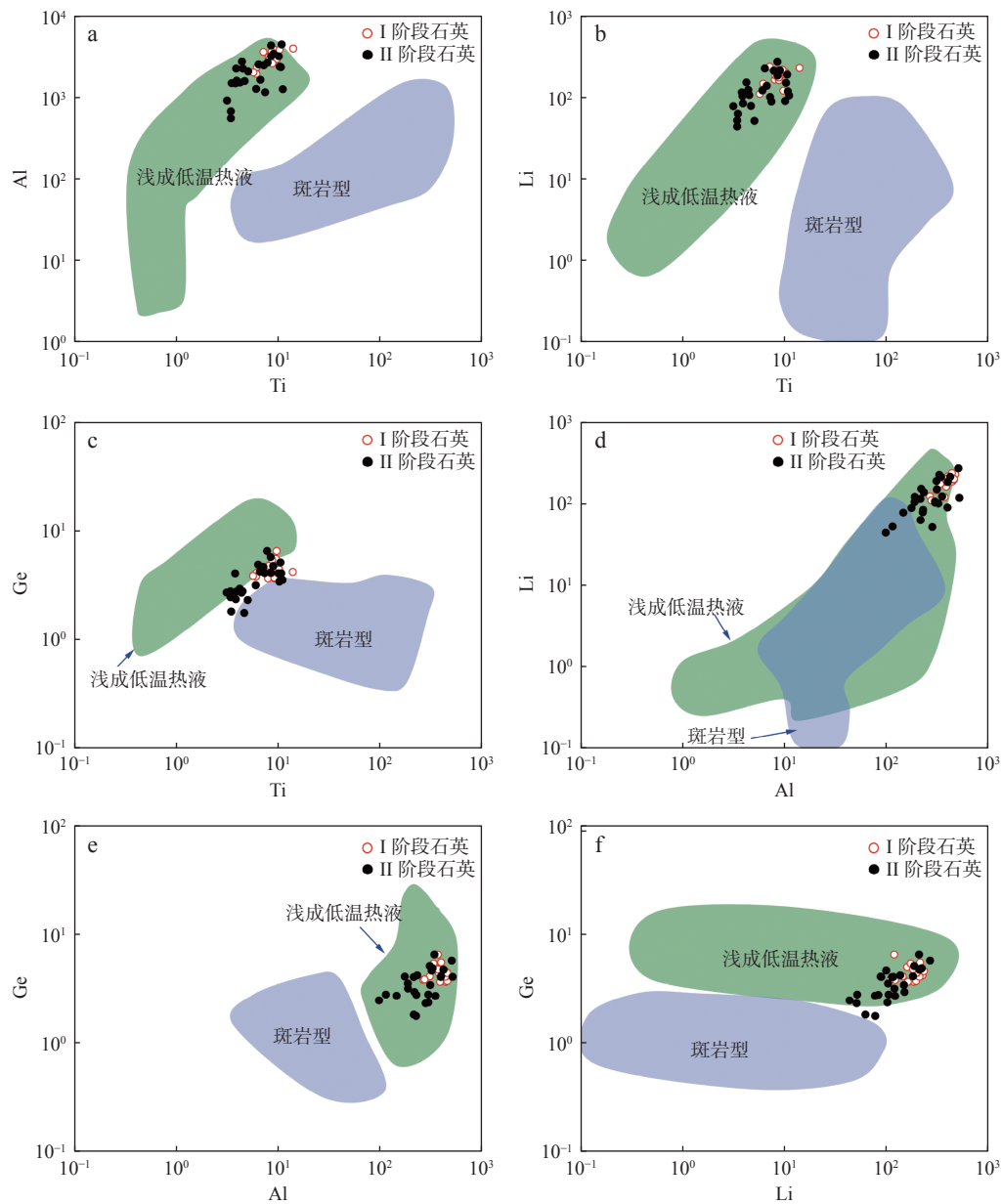


图6 浅成低温热液型、斑岩型铅锌矿床和库尔杂生铅锌矿床石英 Li、Al、Ti 和 Ge 元素对比(底图据 Gao et al., 2022)

Fig. 6 Comparison of Li, Al, Ti and Ge elements in quartz of epithermal type, porphyry type and Kuergasheng Pb-Zn deposit

表 2 库尔杂生铅锌矿床闪锌矿微量元素组成表

Tab. 2 Trace element composition of sphalerite in Kuergasheng Pb-Zn deposit

样品号	Mn	Co	Cu	Ga	Ge	Se	Ag	Cd	In	Sn	Fe	Zn
19KE001-18-1	27.7	16.6	196	300	13.6	< 9.59	0.76	8.22	9.15	918	1.20	59.9
19KE001-18-2	28.1	13.3	39.3	18.8	< 6.66	12.7	0.58	59.3	< 3.43	1 042	1.56	67.4
19KE001-18-3	45.8	31.6	424	335	41.2	226	< 0.20	8.53	12.1	1 349	1.72	52.4
19KE001-18-4	12.0	11.9	404	243	41.9	< 6.17	0.21	11.6	9.34	1 085	1.18	66.3
19KE001-18-5	17.9	19.8	526	186	38.4	7.50	< 0.06	28.5	24.2	1 360	1.47	68.0
19KE001-18-6	17.1	12.1	262	61.9	55.2	< 4.07	0.07	7.34	7.76	1 128	1.48	69.5

注：Fe、Zn含量为%，其他元素含量为10⁻⁶。

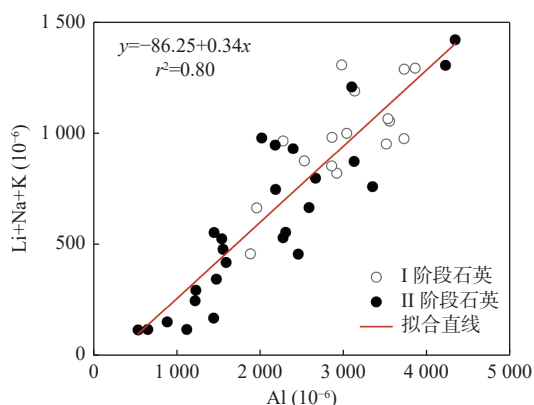


图7 库尔尕生铅锌矿床石英中 Al 与 (Li+Na+K) 的相关关系

Fig. 7 Correlation between Al and (Li+Na+K) in quartz of Kuergasheng Pb-Zn deposit

Ge 含量 $> 50.00 \times 10^{-6}$ (刘英俊等, 1984; 韩照信, 1994; 高永宝等, 2016)。本次测试的闪锌矿 Ge 含量为 $13.62 \times 10^{-6} \sim 55.16 \times 10^{-6}$, 平均值为 38.06×10^{-6} , 与中低温闪锌矿 Ge 含量一致, 与其他微量元素特征指示的温度吻合, 指示成矿温度为中低温。

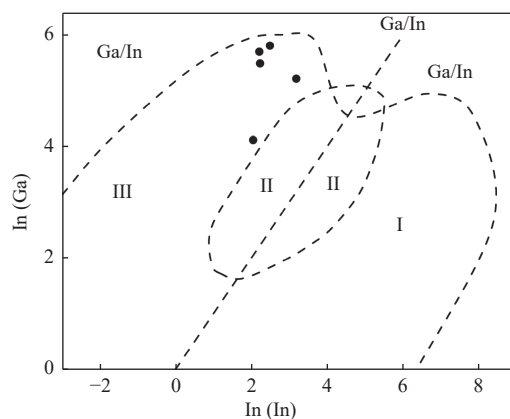
此外, 闪锌矿的 Zn/Fe 值和 Ga/In 值同样可用于判断铅锌矿床形成的温度。低温时, Zn/Fe > 100 ; 中温时, Zn/Fe 值为 $10 \sim 100$; 中偏高温时, Zn/Fe > 100 ; 低温时, Ga/In 值为 $1.0 \sim 100$; 中温时, Ga/In 值为 $0.01 \sim 5.0$; 高温时, Ga/In 值为 $0.001 \sim 1.00$ (韩照信, 1994; 朱赖民等, 1995; Liu et al., 2008)。库尔尕生铅锌矿床 Zn/Fe 值为 $30 \sim 56$ (平均值为 45), Ga/In 值为 $7.7 \sim 32.8$, 指示成矿温度为中低温。

闪锌矿中 Fe 的质量分数通常与温度和压力有关, 常被用作地质温度计和压力计。因此, 笔者利用闪锌矿 GGIMFis 温度计 $T(^{\circ}\text{C}) = -(54.4 \pm 7.3) \cdot \ln[(C_{\text{Ga}}^{0.22} \cdot C_{\text{Ge}}^{0.22}) / (C_{\text{Fe}}^{0.37} \cdot C_{\text{Mn}}^{0.20} \cdot C_{\text{In}}^{0.11})] + (208 \pm 10)$ (Frenzel et al., 2016), 估算库尔尕生铅锌矿床的成矿温度为 $122 \sim 178^{\circ}\text{C}$, 这与前人所做的包裹体测温数据基本一致 ($135 \sim 159^{\circ}\text{C}$, 段世刚等, 2011; $97 \sim 205^{\circ}\text{C}$, 柳晨雨, 2021)。

5.2.2 闪锌矿微量元素组成特征对矿床成因及成矿物质来源的指示

闪锌矿中的微量元素富集特征, 尤其是 Ga/In 值和 Ge 含量等可作为判断矿床成因的有效手段之一。由于 Ga 的地球化学行为与 Al 相似, 在岩浆过程中, Ga 往往大量地分散在含 Al 的黑云母、钾长石、斜长石等造岩矿物中, 造成了岩浆热液中 Ga 的贫化。而 In 则不然, In^{3+} 的离子半径比 Al^{3+} 大得多, 所以在岩浆

作用中 In^{3+} 不利于替代 Al^{3+} 进入矿物晶格, 往往残留富集于岩浆后期热液中。因此, 岩浆热液成因 Pb-Zn 矿床的闪锌矿 $\text{Ga}/\text{In} < 1$, 而层控型 Pb-Zn 矿床 (沉积-改造成因) 的闪锌矿中 $\text{Ga}/\text{In} > 1$ (周卫宁等, 1989)。库尔尕生铅锌矿床闪锌矿中 $\text{Ga}/\text{In} (5.5 \sim 32.8) > 1$, 具有层控型成因的特征。该矿床闪锌矿具有类似层控型矿床贫 Fe ($< 6\%$)、Mn ($< 0.15\%$), 但相对富集 Ga 和 Ge 的特点; 闪锌矿 $\ln(\text{Ga})-\ln(\text{In})$ 关系图点位投在与沉积作用有关的矿床区域 (图 8), 以上结果表明该矿床闪锌矿的形成与沉积作用有关 (李徽, 1986; Qian, 1987)。



I. 与岩浆作用有关的矿床; II. 与火山作用有关的矿床; III. 与沉积作用有关的矿床

图8 库尔尕生铅锌矿床闪锌矿 $\ln(\text{Ga})-\ln(\text{In})$ 关系图 (底图据张乾, 1987)

Fig. 8 Relationship between $\ln(\text{Ga})-\ln(\text{In})$ of sphalerite in Kuergasheng Pb-Zn deposit

与前人测得的库尔尕生铅锌矿床托斯库尔他乌组上亚组围岩微量元素进行对比 (表 3), 发现围岩地层中 Pb 和 Zn 含量较高, 分别是地壳丰度的 $1 \sim 5$ 倍和 $1 \sim 9$ 倍 (黎彤, 1976); Mn 含量 ($163 \times 10^{-6} \sim 1149 \times 10^{-6}$, 均值为 435×10^{-6}) 远高于闪锌矿中 Mn 含量 ($12.0 \times 10^{-6} \sim 45.8 \times 10^{-6}$, 均值为 24.7×10^{-6}); Co 含量 ($8.66 \times 10^{-6} \sim 14.4 \times 10^{-6}$, 均值为 11.5×10^{-6}) 与闪锌矿中 Co 含量 ($11.9 \times 10^{-6} \sim 31.6 \times 10^{-6}$, 均值为 17.5×10^{-6}) 相近, 围岩中 Cu 含量 ($23.4 \times 10^{-6} \sim 80.1 \times 10^{-6}$, 均值为 34.0×10^{-6}) 远低于闪锌矿中 Cu 含量 ($39.3 \times 10^{-6} \sim 526 \times 10^{-6}$, 均值为 308×10^{-6}), 可能是含矿流体运移过程中萃取围岩中成矿物质导致围岩中 Cu 等元素含量下降, 围岩中 Pb、Zn、Mn 和 Co 等元素极易参与到成矿过程中, 不可忽视围岩地层对成矿的影响。

表 3 库尔尕生铅锌矿床围岩微量元素组成表(10⁻⁶)

Tab. 3 Composition of trace elements in the host rock of the Kuergasheng Pb-Zn deposit (10⁻⁶)

地层	样号	岩性	Mn	Ti	Cu	Pb	Zn	Cr	Co	Ba	Be
D ₃ l ^b	KB-2	凝灰质粉砂岩	174	4 294	32.7	30.7	133	69.8	13.4	670	2.82
	KB-5	凝灰质粉砂岩	163	3 504	24.8	22.7	84.1	57.2	14.4	466	2.05
	KB-14	凝灰质粉砂岩	194	3 005	25.7	33.6	474	46.0	10.0	426	1.88
	KB-28	凝灰质粉砂岩	418	2 303	80.1	21.9	899	51.2	11.1	276	1.33
	KB-10	岩屑砂岩	1 149	3 646	25.1	24.5	210	54.6	10.0	323	1.71
	KB-18	岩屑砂岩	604	2 544	26.1	32.2	688	49.4	11.9	301	1.38
	KB-21	岩屑砂岩	331	3 812	41.8	61.6	529	63.6	13.5	419	1.72
	KB-3	细砂岩	432	2 713	23.7	21.0	104	48.2	11.4	389	1.51
	KB-4	细砂岩	331	2 625	25.2	20.5	90.1	49.0	10.4	485	1.39
	KB-9	细砂岩	551	2 692	23.4	29.8	117	46.0	8.66	298	1.32
	KB-12	细砂岩	509	2 838	29.9	23.8	177	47.8	9.64	391	1.51
	KB-15	细砂岩	360	2 425	24.0	20.4	261	45.8	12.1	272	1.26
	KB-17	细砂岩	444	2 569	26.3	24.6	138	49.7	10.8	360	1.36
	KB-26	细砂岩	457	2 795	67.9	23.0	246	62.2	13.5	348	1.61

注：数据来源于戴玉林，1994。

前人通过 Pb 同位素研究亦发现, 库尔尕生铅锌矿床 Pb 来源于围岩地层(段士刚, 2011)。表明托斯库尔他乌组上亚组(D₃l^b)为矿床的形成提供了部分成矿物质, 地层与矿床的形成密切相关。

6 结论

(1) 库尔尕生铅锌矿床产在上古生界上泥盆统托斯库尔他乌组上亚组(D₃l^b)沉积岩中, 矿体受断裂控制, 由充填作用形成, 沿断裂呈脉状、网脉状和透镜状产出。矿石以硫化物矿石为主, 金属矿物主要为方铅矿和闪锌矿, 非金属矿物主要为石英和方解石, 次生矿物可见铜蓝、孔雀石和少量铅矾。矿石结构有自形粒状结构、半自形粒状结构和他形粒状结构。矿石构造以浸染状构造为主, 次为块状构造、团块状构造、蜂窝状构造和稠密浸染状构造。围岩蚀变较弱, 可见弱的硅化和碳酸盐化。成矿阶段包括无石英阶段(Ⅰ)、石英-多金属硫化物阶段(Ⅱ)和方解石阶段(Ⅲ)。

(2) 库尔尕生铅锌矿床石英原位微区成分分析表明, 成矿流体温度较低, 并且成矿流体温度从Ⅰ阶段到Ⅱ阶段在逐渐降低, pH 值从Ⅰ阶段到Ⅱ阶段逐渐升

高。因此温度降低、pH 值升高可能为库尔尕生铅锌矿床主成矿阶段的金属沉淀机制。与斑岩型和浅成低温热液脉型矿床中的石英微量元素对比, 总体上具有浅成低温热液脉型石英的特征。

(3) 库尔尕生铅锌矿床闪锌矿的特征微量元素分析指示闪锌矿形成于中低温, 并且闪锌矿 GGIMFis 温度计进一步限定成矿温度在 122~178 ℃。闪锌矿 Ga/In 值与 ln(Ga)-ln(In) 投图反映库尔尕生矿床成矿作用与沉积作用有关。综合围岩地层的微量元素特征及前人开展的铅同位素研究, 推测库尔尕生铅锌矿床成矿物质主要来源于围岩地层。

致谢：野外工作中得到了新疆维吾尔自治区国家 305 项目办公室领导和专家的大力支持, 成文过程中得到了中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心冯李强博士的热情帮助, 谨此一并致谢!

参考文献(References):

蔡劲宏, 周卫宁, 张锦章. 江西银山铜铅锌多金属矿床闪锌矿的标型特征[J]. 桂林工学院学报, 1996, 16(4): 370-375.
CAI Jinhong, ZHOU Weining, ZHANG Jinzhang. Typomorphic characteristics of sphalerites in the Yinshan copper, lead and zinc polymetallic deposit, Jiangxi[J]. Journal of Guilin Insti-

- tute of Technology, 1996, 16(4): 370–375.
- 陈小丹, 陈振宇, 程彦博, 等. 热液石英中微量元素特征及应用: 认识与进展[J]. 地质论评, 2011, 57(5): 707–717.
- CHEN Xiaodan, CHEN Zhenyu, CHENG Yanbo, et al. Distribution and Application of Trace Elements in Hydrothermal Quartz: Understanding and prospecting[J]. Geological Review, 2011, 57(5): 707–717.
- 戴玉林. 库尔尕生布拉克铅锌矿床地质特征及成因探讨[J]. 矿产与地质, 1994, 8(5): 326–329.
- 段士刚, 薛春纪, 李野, 等. 新疆库尔尕生铅锌矿床地质、流体包裹体和同位素地球化学[J]. 矿床地质, 2012, 31(5): 1014–1024.
- DUAN Shigang, XUE Chunji, LI Ye, et al. Geology, fluid inclusions and isotopic geochemistry of Kuergasheng lead-zinc deposit in western Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(5): 1014–1024.
- 段士刚. 新疆西天山赛里木微地块区域成矿规律与找矿方向[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011.
- DUAN Shigang. Mineralization law and prospecting direction in the Serimu microplot area of West Tianshan Mountain, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- 高永宝, 李侃, 钱兵, 等. 扬子北缘马元铅锌矿床闪锌矿微量元素及 S-Pb-He-Ar-C 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2016, 32(1): 251–263.
- GAO Yongbao, LI Kan, QIAN Bing, et al. Trace elements S-Pb-He-Ar and C isotopes of sphalerite in the Mayuan Pb-Zn deposit, at the northern margin of the Yangtze plate, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(1): 251–263.
- 顾雪祥, 章永梅, 彭义伟, 等. 西天山博罗科努成矿带与侵入岩有关的铁铜钼多金属成矿系统: 成岩成矿地球化学与构造-岩浆演化[J]. 地学前缘, 2014, 21(5): 156–175.
- GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, PENG Yiwei, et al. The Fe-Cu-Mo polymetallic mineralization system related to intermediate-acid intrusions in the Boluokenu metallogenic belt of the West Tianshan, Xinjiang: Rock-and ore-forming geochemistry and tectonomagmatic evolution[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(5): 156–175.
- 顾雪祥, 章永梅, 王新利, 等. 新疆西天山可克萨拉-艾木斯呆依铁铜矿床成岩成矿年代学及其地质意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 195–209.
- GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, WANG Xinli, et al. Geochronology of intrusive rocks and associated ores of the Kekesala-Aimusidaiyi Fe-Cu deposit in the West Tianshan, Xinjiang and its geologic significance[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(6): 195–209.
- 郭飞, 王智琳, 许德如, 等. 湖南栗山铅锌铜多金属矿床闪锌矿微量元素特征及成矿指示意义[J]. 地学前缘, 2020, 27(4): 66–81.
- GUO Fei, WANG Zhilin, XU Rude, et al. Trace element characteristics of sphalerite in the Lishan Pb-Zn-Cu polymetallic deposit in Hunan Province and the metallogenic implications[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(4): 66–81.
- 郭闯, 卢玉杰, 欧阳志强, 等. 湖南水口山老鸦巢金矿床地质特征及成因分析[J]. 西北地质, 2023, 56(5): 294–307.
- GUO Chuang, LU Yujie, OUYANG Zhiqiang, et al. Geological Characteristics and Genetic Analysis of Laoyachao Gold Deposit in Shuikoushan, Hunan Province[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(5): 294–307.
- 韩照信. 秦岭泥盆系铅锌成矿带中闪锌矿的标型特征[J]. 西安地质学院学报, 1994, 16(1): 12–17.
- HAN Zhaoxin. The typomorphic characteristic of the sphalerite in the Qinling Devonian system lead-zinc metallogenic belt[J]. Journal of Xi'an Institute of Geology, 1994, 16(1): 12–17.
- 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976, (3): 167–174.
- LI Tong. Chemical element abundances in the earth and its major shells[J]. Geochemistry, 1976, (3): 167–174.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- 李徽. 闪锌矿中杂质元素的特征及地质意义[J]. 地质与勘探, 1986, 22(10): 42–46.
- 李野. 新疆西天山达巴特铜钼矿地质地球化学及成因[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- LI Ye. Geological and geochemical characteristics and genesis of Dabate Cu-Mo deposit, Western Tianshan, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2012.
- 刘畅. 西天山达巴特铜钼成矿流体性质及演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- LIU Chang. The nature and evolution of ore fluids in Dabate Cu-Mo Deposit, Western Tianshan[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 刘凤鸣. 库尔尕生铅锌矿床地质特征及成因浅析[J]. 新疆有色金属, 2007, 30(3): 4–6.
- 刘勇胜, 胡兆初, 李明, 等. LA-ICP-MS 在地质样品元素分析中的应用[J]. 科学通报, 2013, 58(36): 3753–3769.
- LIU Yongsheng, HU Zhaochu, LI Ming, et al. Application of LA-ICP-MS in elemental analysis of geological samples[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(36): 3753–3769.
- 吕行. 新疆西天山达巴特铜钼矿床萤石流体包裹体及元素地球化学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- LV Xing. Study on Fluid Inclusions and Geochemical Characteristics of Major and Trace Elements of Fluorite in the Dabate Cu-Mo Deposit, West Tianshan, Xinjiang[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2021.
- 柳晨雨, 章永梅, 顾雪祥, 等. 新疆西天山库尔尕生铅锌矿床成因——来自流体包裹体和硫同位素的证据[J]. 新疆地质,

- 2021, 39(4): 655–660.
- LIU Chenyu, ZHANG Yongmei, GU Xuexiang, et al. The Genesis of the Kuergasheng Pb-Zn Deposit in Western Tianshan, Xinjiang: Evidence from Fluid Inclusions and Sulfur Isotopes[J]. *Xinjiang Geology*, 2021, 39(4): 655–660.
- 唐功建, 陈海红, 王强, 等. 西天山达巴特 A 型花岗岩的形成时代与构造背景[J]. 岩石学报, 2008, 24(5): 947–958.
- TANG Gongjian, CHEN Haihong, WANG Qiang, et al. Geochronological age and tectonic background of the Dabate A-type granite pluton in the west Tianshan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(5): 947–958.
- 王核, 彭省临, 赖健清, 等. 新疆温泉县达巴特铜矿火山机构的厘定及其意义[J]. *地质找矿论丛*, 2000, 15(4): 346–350.
- WANG He, PENG Shenglin, LAI Jianqing, et al. Determination of volcanic edifice and its geological significance to Dabate copper ore deposit in Wenquan county, Xinjiang[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2000, 15(4): 346–350.
- 新疆新地地质勘查有限公司. 新疆温泉县北达巴特铜矿勘探报告[R]. 新疆新地地质勘查有限公司, 2011.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局. 西天山地区 1: 500000 地质图[R]. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局, 2005.
- 新疆有色地质矿产勘查院. 新疆博乐市库尔尕生铅多金属矿普查报告[R]. 新疆有色地质矿产勘查院, 2002.
- 薛春纪, 赵晓波, 莫宣学, 等. 西天山巨型金铜铅锌成矿带构造成矿演化及找矿方向[J]. *地质学报*, 2014, 88(12): 2490–2531.
- XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, MO Xuanxue, et al. Tectonic metallogenic evolution and prospecting direction of giant gold-copper-Pb-Zn metallogenic belt in West Tianshan[J]. *Acta Geological Sinica*, 2014, 88(12): 2490–2531.
- 薛春纪, 赵晓波, 张国震, 等. 西天山金铜多金属重要成矿类型、成矿环境及找矿潜力[J]. *中国地质*, 2015, 42(3): 381–410.
- XUE Chunji, ZHAO Xiaobo, ZHANG Guozhen, et al. Important mineralization types, mineralization environment and prospecting potential of gold-copper polymetals in West Tianshan[J]. *Geology in China*, 2015, 42(3): 381–410.
- 肖红, 张伟博. 新疆博乐市库尔尕生铅锌矿地质普查报告[R]. 新疆有色地质矿产勘查局 703 队, 2002.
- 伊其安, 邸晓辰, 卞翔, 等. 新疆博乐市库尔尕生铅锌矿地质特征[J]. *新疆有色金属*, 2013, 36(4): 30–33.
- 张作衡, 毛景文, 王志良, 等. 新疆西天山达巴特铜矿床地质特征和成矿时代研究[J]. *地质论评*, 2006, 52(5): 683–689.
- ZHANG Zuoheng, MAO Jingwen, WANG Zhiliang, et al. Geology and Metallogenetic Epoch of the Dabate Porphyry Copper Deposit in West Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 683–689.
- 张作衡, 王志良, 陈伟十, 等. 西天山达巴特斑岩型铜矿床流体地球化学特征和成矿作用[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1310–1318.
- ZHANG Zuoheng, WANG Zhiliang, CHEN Weishi, et al. Fluid geochemical characteristics and metallogenic effects of Dabate porphyry copper deposits in West Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1310–1318.
- 张作衡, 王志良, 左国朝, 等. 西天山达巴特矿区火山岩的形成时代, 构造背景及对斑岩型矿化的制约[J]. *地质学报*, 2008, 82(11): 1494–1503.
- ZHANG Zuoheng, WANG Zhiliang, ZUO Guochao, et al. Ages and tectonic settings of the volcanic rocks in Dabate ore district in West Tianshan Mountains and their constraints on the porphyry-type mineralization West Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Geological Sinica*, 2008, 82(11): 1494–1503.
- 张辉善, 李艳广, 全守村, 等. 阿尔金喀腊达坂铅锌矿床金属硫化物元素地球化学特征及其对成矿作用的制约[J]. 岩石学报, 2018, 34(8): 2295–2311.
- ZHANG Huishan, LI Yanguang, QUAN Shoucun, et al. Geochemical characteristics of metallic sulfides from the Kaladaban deposit in Xinjiang and its implications for Pb-Zn ore-forming mechanism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(8): 2295–2311.
- 张天栋, 刘忠法, 邸洪飞, 等. 湘南宝山铜铅锌多金属矿床闪锌矿元素地球化学特征及其对成矿的制约[J]. *矿产勘查*, 2021, 12(8): 1716–1726.
- ZHANG Tiandong, LIU Zhongfa, DI Hongfei, et al. Geochemical characteristics of sphalerite from the Baoshan deposit in southern Hunan and its implications for Cu-Pb-Zn-Ag polymetallic oreforming mechanism Xinjiang and its implications for Pb-Zn ore-forming mechanism[J]. *Mineral Exploration*, 2021, 12(8): 1716–1726.
- 周卫宁, 傅金宝, 李达明. 广西大厂矿田铜坑-长坡矿区闪锌矿的标型特征研究[J]. *矿物岩石*, 1989, 9(2): 65–72.
- ZHOU Weining, FU Jinbao, LI Daming. Typomorphic characteristics of sphalerite in Tongkeng-Changpo mine of Dachang ore field Guangxi, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 1989, 9(2): 65–72.
- 朱赖民, 袁海华, 栾世伟. 金阳底苏会东大梁子铅锌矿床内闪锌矿微量元素标型特征及其研究意义[J]. 四川地质学报, 1995, (1): 49–55.
- ZHU Laimin, YUAN Haihua, LUAN Shiwei. Typomorphic characteristics and their significance of minor elements of sphalerite from Disu and Daliangzi Pb-Zn deposits, Sichuan[J]. *Sichuan Journal of Geology*, 1995, (1): 49–55.
- 张乾. 利用方铅矿、闪锌矿的微量元素图解法区分铅锌矿床的成因类型[J]. 地质地球化学, 1987, (9): 64–66.
- Audétat A, Garbe Schönberg D, Kronz A, et al. Characterisation of a natural quartz crystal as a reference material for microanalytical

- determination of Ti, Al, Li, Fe, Mn, Ga and Ge[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2015, 39(2): 171–184.
- Cao R, Yan S C, Chen B, et al. Cu-Mo differential mineralization mechanism of the Dabate Polymetallic Deposit in Western Tianshan, NW China: Evidence from geology, fluid inclusions, and oxygen isotope systematics[J]. *Resource Geology*, 2020, 70(1): 50–69.
- Flem B, Larsen R B, Grimstvedt A, et al. In situ analysis of trace elements in quartz by using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 2002, 182(2–4): 237–247.
- Frenzel M, Hirsch T, Gutzmer J. Gallium, germanium, indium and other trace and minor elements in sphalerite as a function of deposit type—A meta-analysis[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 76: 52–78.
- Gao S, Zou X, Hofstra A H, et al. Trace elements in quartz: Insights into source and fluid evolution in magmatic-hydrothermal systems[J]. *Economic Geology*, 2022, 117(6): 1415–1428.
- Götze J, Plötze M, Graupner T, et al. Trace element incorporation into quartz: a combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(18): 3741–3759.
- Götze T, Ramseyer K. Trace element characteristics, luminescence properties and real structure of quartz[J]. *Quartz: Deposits, Mineralogy and Analytics*, 2012: 265–285.
- Hayden L A, Watson E B, Wark D A. A thermobarometer for sphene (titanite)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, 155: 529–540.
- Jacamon F, Larsen R B. Trace element evolution of quartz in the charnockitic Kleivan granite, SW-Norway: The Ge/Ti ratio of quartz as an index of igneous differentiation[J]. *Lithos*, 2009, 107(3–4): 281–291.
- Larsen R B, Henderson I, Ihlen P M, et al. Distribution and petrogenetic behaviour of trace elements in granitic pegmatite quartz from South Norway[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2004, 147: 615–628.
- Liu Y, Hu Z, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1–2): 34–43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55: 1535–1546.
- Maydagán L, Franchini M, Rusk B, et al. Porphyry to epithermal transition in the Altar Cu-(Au-Mo) deposit, Argentina, studied by cathodoluminescence, LA-ICP-MS, and fluid inclusion analysis[J]. *Economic Geology*, 2015, 110(4): 889–923.
- Rottier B, Casanova V. Trace element composition of quartz from porphyry systems: a tracer of the mineralizing fluid evolution[J]. *Mineralium Deposita*, 2021, 56: 843–862.
- Rusk B G, Lowers H A, Reed M H. Trace elements in hydrothermal quartz: Relationships to cathodoluminescent textures and insights into vein formation[J]. *Geology*, 2008, 36(7): 547–550.
- Wang C M, Deng J, Zhang S T, et al. Sediment-hosted Pb-Zn deposits in southwest Sanjiang Tethys and Kangdian area on the western margin of Yangtze Craton[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2010, 84(6): 1428–1438.
- Wang Y, Qiu K F, Müller A, et al. Machine learning prediction of quartz forming environments[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(8): e2021JB021925.
- Wark D A, Watson E B. Titanite: a titanium-in-quartz geothermometer[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(6): 743–754.
- Wei C, Ye L, Hu Y, et al. Distribution and occurrence of Ge and related trace elements in sphalerite from the Leihong carbonate-hosted Zn-Pb deposit, northeastern Yunnan, China: Insights from SEM and LA-ICP-MS studies[J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 115: 103175.
- Qian Z. Trace elements in galena and sphalerite and their geochemical significance in distinguishing the genetic types of Pb-Zn ore deposits[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1987, 6: 177–190.