第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：邵雨，齐晗翼，汪玉会，等. 西昆仑库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床硫化物微量元素对矿床成因的制约[J]. 西北地质，2026，59(5)：103−114. DOI：10.12401/j.nwg.2025124

Citation：SHAO Yu, QI Hanyi, WANG Yuhui, et al. Constraints on Ore Genesis by Trace Elements of Sulfide Minerals from the Kukaazi Pb-Zn Polymetallic Deposit in Western Kunlun Orogen[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(5)：103−114. DOI：10.12401/j.nwg.2025124

西昆仑库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床硫化物微量元素对矿床成因的制约

邵雨[1,2,3]，齐晗翼[1]，汪玉会[4]，张兴春[2]，冷成彪[1,*]

（1. 东华理工大学地球与行星科学学院，江西 南昌 330013；2. 中国科学院地球化学研究所，贵州 贵阳 550081；3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 贵州省地质矿产中心实验室，贵州 贵阳 550018）

摘 要：库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床位于新疆叶城县西合休乡境内，矿区分为东、南、北 3 个矿段，矿体主要呈透镜状、脉状赋存于中元古界长城系大理岩、石榴子石类夕卡岩、大理岩和变凝灰岩之间，显示层控特征。目前关于该矿床的成因类型认识还不够充分，故笔者尝试采用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱（LA-ICP-MS）技术，对矿区黄铁矿和磁黄铁矿开展原位微区微量元素分析，进而根据其微量元素特征来制约矿床成因。结果表明：黄铁矿以富 Ni（均值 43.7×10^{-6}）、Se（均值 49.1×10^{-6}），贫 Co（均值 0.71×10^{-6}）为特征，Co/Ni 值极低（0.01～0.02），且 Cu、Sn 含量均 $<1\times10^{-6}$，指示低温沉积成因。磁黄铁矿中 Co、Ni 含量较黄铁矿显著升高（均值分别为 188×10^{-6}、205×10^{-6}），Co/Ni 值为 0.02～0.67 和 1.58～1.74，暗示多期成矿作用。此外，通过研究微量元素赋存形式显示，Co、Ni、Mn、Se 在黄铁矿中以类质同象替代 Fe 或 S，而 Pb、Bi 以纳米微粒形式赋存，磁黄铁矿中 Pb、Bi 则呈微米级包裹体。结合前人已有研究和 Sb/Bi 值及区域加里东期岩浆事件（460～450 Ma），认为矿床早期为海底热水沉积成因，后期受奥陶纪岩浆热液叠加改造。本研究为西昆仑造山带多期成矿作用提供了关键地球化学约束。

关键词：Pb-Zn 多金属矿床；黄铁矿；磁黄铁矿；LA-ICP-MS；库喀阿孜

中图分类号：P611 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0103-12

Constraints on Ore Genesis by Trace Elements of Sulfide Minerals from the Kukaazi Pb-Zn Polymetallic Deposit in Western Kunlun Orogen

SHAO Yu[1,2,3], QI Hanyi[1], WANG Yuhui[4], ZHANG Xingchun[2], LENG Chengbiao[1,*]

（1. School of Earth and Planetary Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China；2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, Guizhou, China；3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China；4. Guizhou Central Laboratory of Geology and Mineral Resources, Guiyang 550018, Guizhou, China）

收稿日期：2025-07-14；**修回日期**：2025-10-10；**责任编辑**：曹佰迪

基金项目：国家自然科学基金项目（41872097）资助。

作者简介：邵雨（2001−），男，硕士，主要从事天体地球化学与矿床地球化学研究。E−mail：sy18302665120@126.com。

*通讯作者：冷成彪（1982−），男，教授，主要从事矿床学及地球化学的研究与教学工作。E−mail：lcb8207@163.com。

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

Abstract：The Kukaazi Pb-Zn polymetallic deposit is located in Xihexiu township, Yecheng county, Xinjiang. The mining area comprises eastern, southern, and northern ore sections. The ore bodies occur predominantly as lenticular and vein-type formations hosted between the Mesoproterozoic Changcheng system marble, garnet-rich skarn, marble, and metamorphic tuff, exhibiting strata-bound characteristics. The genetic type of this deposit remains inadequately constrained. Therefore, this study endeavors to conduct in situ micro-area trace element analysis of pyrite and pyrrhotite from the mining area using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The trace element signatures of these minerals will subsequently be utilized to constrain the genesis of the deposit. The results demonstrate that pyrite is characterized by enrichment in Ni (mean 43.7×10^{-6}) and Se (mean 49.1×10^{-6}), depletion in Co (mean 0.71×10^{-6}), and extremely low Co/Ni ratios (0.01 – 0.02). Cu and Sn contents are consistently <1 ppm, collectively indicating a low-temperature sedimentary origin. Pyrrhotite exhibits significantly elevated Co and Ni contents compared to pyrite (mean values: 188 ppm and 205 ppm, respectively). The Co/Ni ratios range between 0.02 – 0.67 and 1.58 – 1.74, suggesting multiple mineralization events. Furthermore, trace element occurrence modes reveal that in pyrite, Co, Ni, Mn, and Se exist primarily through isomorphic substitution of Fe or S atoms in the crystal lattice, while Pb and Bi occur as nanoscale particles (typically <100 nm).In pyrrhotite, however, Pb and Bi manifest as micron-sized inclusions (1 – 10 μm). Based on integrated evidence from previous studies, Sb/Bi ratios, and regional Caledonian magmatism (460 – 450 Ma), the deposit is interpreted as having an initial submarine hydrothermal-sedimentary origin, overprinted by Ordovician magmatic-hydrothermal modification. This research establishes key geochemical constraints on multi-stage mineralization events in the West Kunlun Orogen.

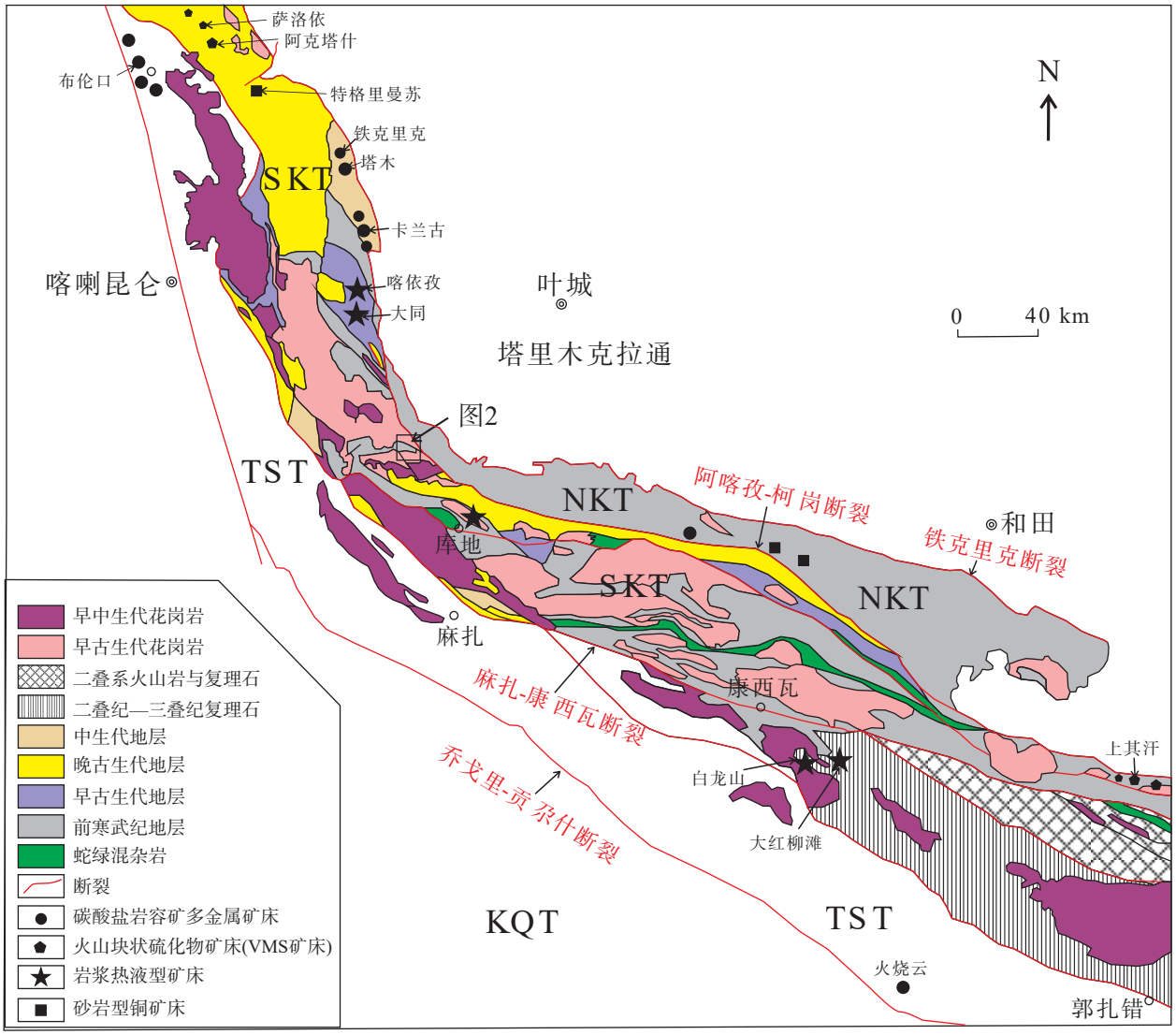
Keywords：Pb-Zn polymetallic deposit；pyrite；pyrrhotite；LA-ICP-MS；Kukaazi

矿物微量元素组成及特征的研究日益深入，尤其是硫化物微量元素的含量及其比值为揭示成矿物质与成矿流体来源、成矿物理化学环境以及矿床成因机制提供了关键科学依据（Koglin et al., 2010; Ulrich et al., 2011）。黄铁矿和磁黄铁矿作为地壳中分布极为广泛的两种硫化物，它们均能在沉积岩、岩浆岩和变质岩中形成，通过黄铁矿和磁黄铁矿微量元素含量和比值，可以推断黄铁矿和磁黄铁矿的类型与成因（Large et al., 2007; 冷成彪等，2017）。相较于电子探针分析（EPMA），激光剥蚀电感耦合等离子体质谱（LA-ICP-MS）具有高灵敏度、低检测限与强抗干扰性等优点，可实现样品的原位、实时、快速分析（张红雨等，2022），因而被广泛应用于硫化物原位微量元素研究，成为该领域的重要研究手段。

新疆库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床位于西昆仑地区，因高海拔、地形陡峻且交通不便，导致该矿床前期地质工作薄弱，其矿床成因机制认识尚不充分。 Zhang et al.（2014）根据硫同位素及白钨矿 Sm-Nd 年代学认为成矿作用与中元古代海相火山活动相关的海底热泉作用有关， Leng et al.（2018）基于辉钼矿 Re-Os、白钨矿 Sm-Nd 定年及同位素地球化学分析，提出成矿作用可能与同时期的奥陶纪花岗岩浆热液活动直接相关; Leng et al.（2019）进一步提出其形成于大陆弧环境的远源 Pb-Zn 矽卡岩矿床。因此，笔者在矿相学观察的基础上，采用 LA-ICP-MS 对矿区产出黄铁矿和磁黄铁矿开展原位微区分析，探讨其微量元素赋存形式及分配行为，进一步约束该矿床的成因机制，为西昆仑地区该类型矿床的地质勘探工作提供资料。

1 区域地质背景

库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床位于西昆仑造山带。西昆仑造山带是一条夹在塔里木克拉通和喀喇昆仑–羌塘地块（KQT）之间的 NW 向的褶皱带（Zhang et al., 2016; 图 1）。前人研究表明，从构造上，西昆仑造山带自北向南主要划分为北昆仑地体（NKT）、南昆仑地体（SKT）、塔什库尔干–甜水海地体（TST）和喀喇昆仑–羌塘地体（KQT）4 个构造单元（丁坤等，2020），这些地体被奥依塔格–库地缝合带、麻扎–康西瓦缝合带、红山湖–乔尔天山缝合带分割（Mattern et al., 2000; Jiang et al., 2002; Xiao et al., 2002; Xiao et al., 2005; Zhang et al., 2007）（图 1）。其中，南昆仑地体（SKT）作



NKT.北昆仑地体；SKT.南昆仑地体；TST.塔什库尔干–甜水海地体；KQT.喀喇昆仑–羌塘地体

图1　西昆仑造山带简化地质图和主要矿床分布(据 Leng et al.，2019 修改)

Fig. 1　Simplified geological map of the western Kunlun orogen and distribution of major ore deposits

为西昆仑造山带的重要组成部分，位于奥依塔格–库地缝合带以南、麻扎–康西瓦缝合带以北的区域。该地体由多期次构造单元构成，出露前寒武纪、古生代及中生代地层，并发育蛇绿混杂岩等地质体(Xiao et al., 2003; Yuan et al., 2005)，其特征是存在前寒武纪片麻岩–片岩–混合岩杂岩和库地蛇绿岩(Xiao et al., 2002; Yin et al., 2000)，其南部被许多早石炭世—晚三叠世弧型岩浆岩占据(Xiao et al., 2002)。该地体内岩浆活动较为强烈，其岩石组合类型相对复杂，大致可分为两个带。北带是与原特提斯洋演化密切相关的早古生代岩浆岩带；南带则为古特提斯洋演化密切相关的晚古生代—早中生代岩浆岩带(Zhang et al., 2018, 2019; Yin et al., 2020; 陶再礼, 2022)。

西昆仑造山带自新元古代以来，经历了多期构造、岩浆及成矿作用(许志琴等, 2011)，从元古代到燕山期都发育岩浆活动，出露岩性主要为钾长花岗岩、花岗闪长岩、其次为黑云母花岗岩、二云母花岗岩、二长岩、玄武岩，另外也见少量超基性岩出露。岩体广泛侵入元古代变质岩地层中，出露宽度数百米至数十千米不等(汪玉会等, 2013)。

2　矿床地质特征

库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床在大地构造上位于西昆仑中间地块及显生宙岩浆弧带(孙海田等, 2003)。其北缘以柯岗断裂带(库地北断裂)为界，南缘以康西

瓦超岩石圈大断裂为界(图 1)。围岩主体为长城群低变质陆源碎屑岩、变火山岩及大理岩(图 2a),其层理走向为 160°～210°,陡倾伏,倾角为 60°～80°(Leng et al., 2018; 图 2b)。该矿区出露有二长岩和花岗闪长岩等岩体(图 2a),主要为一套准铝质(铝饱和指数 A/CNK 为 0.91～1.05)、钙碱性系列中–酸性岩石,富集轻稀土元素(LREEs)和大离子亲石元素(LILEs, 如 K、Rb),相对亏损高场强元素(HFSEs, 如 Nb、Ta、Ti、P)(汪玉会等, 2013; Leng et al., 2018, 2019),表现出较高的初始$^{87}Sr/^{86}Sr$值和锆石的负 $\varepsilon_{Hf}(t)$值(Yuan et al., 2003; Chao et al., 2013; Jia et al., 2013)。

矿体主要呈透镜状、脉状和似层状发育在灰白色条纹状大理岩与绿色绿泥石石英板岩之间的石榴子石类夕卡岩中、大理岩与变流纹质凝灰岩之间,白色粗晶大理岩、灰白色变凝灰岩中,具有明显层控特征。根据矿物组合和空间分布,矿区可分为南、北、东 3 个矿段。南矿段以铅锌矿化为主,伴有磁铁矿化,主要金属矿物为铁闪锌矿、含铁闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、磁黄铁矿。铅锌矿体的厚为 5～10 m,最高可达 14 m,已控制长度约为 80 m;铅锌矿石 Pb 平均品位为 13.7 %, Zn 品位为 9.9 %。北矿段铅–锌金属矿体主要产于石榴子石类夕卡岩,矿体以铜、锌矿化为主,伴生有铁、铅、钨等矿化。北矿段主要金属矿物为铁闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿,次要矿物为毒砂、方铅矿、黝铜矿,伴生有益金属矿物有白钨矿、自然铋和银、镉。该矿体总长为 80～200 m,宽为 3～12 m,其中一个大型 Cu-W-(Zn-Pb)矿体厚度超过 6 m, Cu 平均品位为 0.9%、WO_3 为 0.2%(最高达 0.92%)、Zn 为 0.8%、Pb 为 0.3%。东矿段主要金属矿物为方铅矿、铁闪锌矿等。矿石构造主要有块状、稠密浸染状、稀疏浸染状、团块状、脉状、次要为斑状、角砾状;矿石结构主要有胶状结构、竹叶状结构、自形粒状结构、半自形–他形粒状结构、固溶体出溶结构(图 3)。围岩蚀变类型主要有夕卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化、硅化等。关于围岩蚀变的描述可参阅文献汪玉会等(2013)和 Leng et al.(2018, 2019)。

该矿床可能存在两期成矿作用,包括早期成岩阶段和晚期岩浆–热液成岩阶段(Zhang et al., 2014)。早期成岩阶段形成的似层状、透镜状的 Cu-Zn 和 Pb-Zn 矿体与地层物质沉积时和海底火山活动有关的热水沉积作用有关,发育有胶状黄铁矿、结晶颗粒极为细小的石榴子石;晚期岩浆–热液成岩阶段为矿体在加里东时期遭受构造、花岗岩岩浆活动的影响而发生了改造,形成白钨矿化及 Pb-Zn 矿体的形态。

3 样品与分析方法

笔者北矿段二号洞和三号洞采集了 13 件典型矿

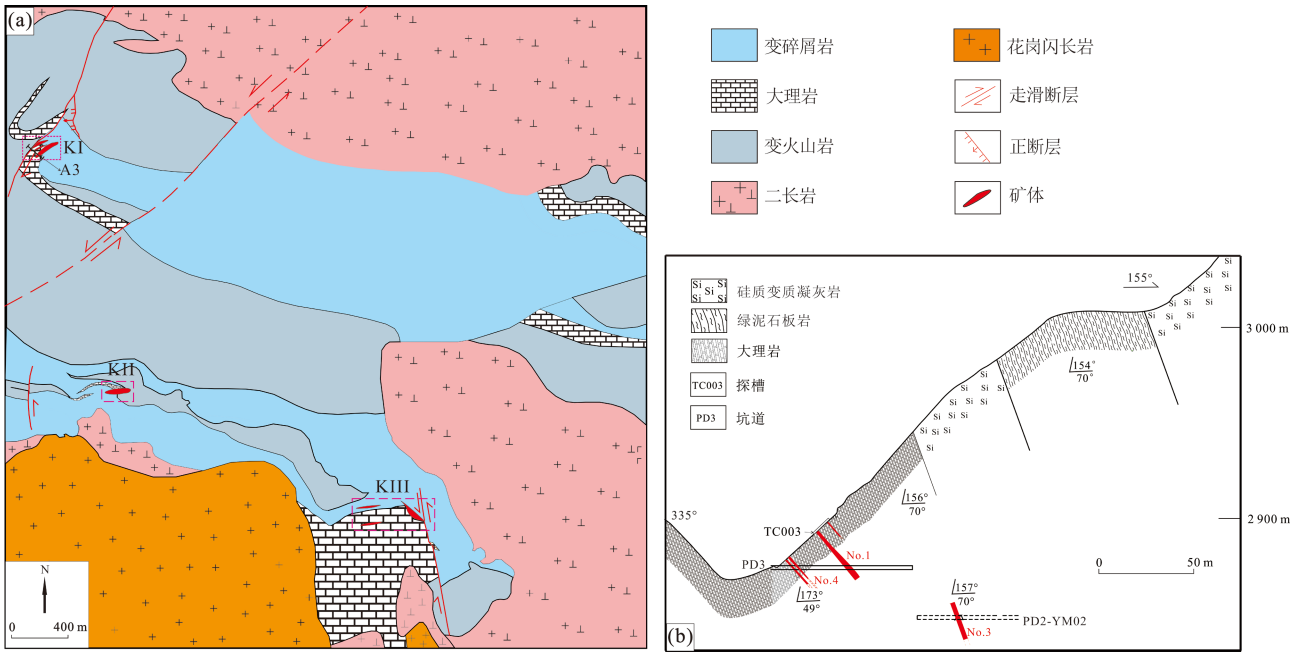
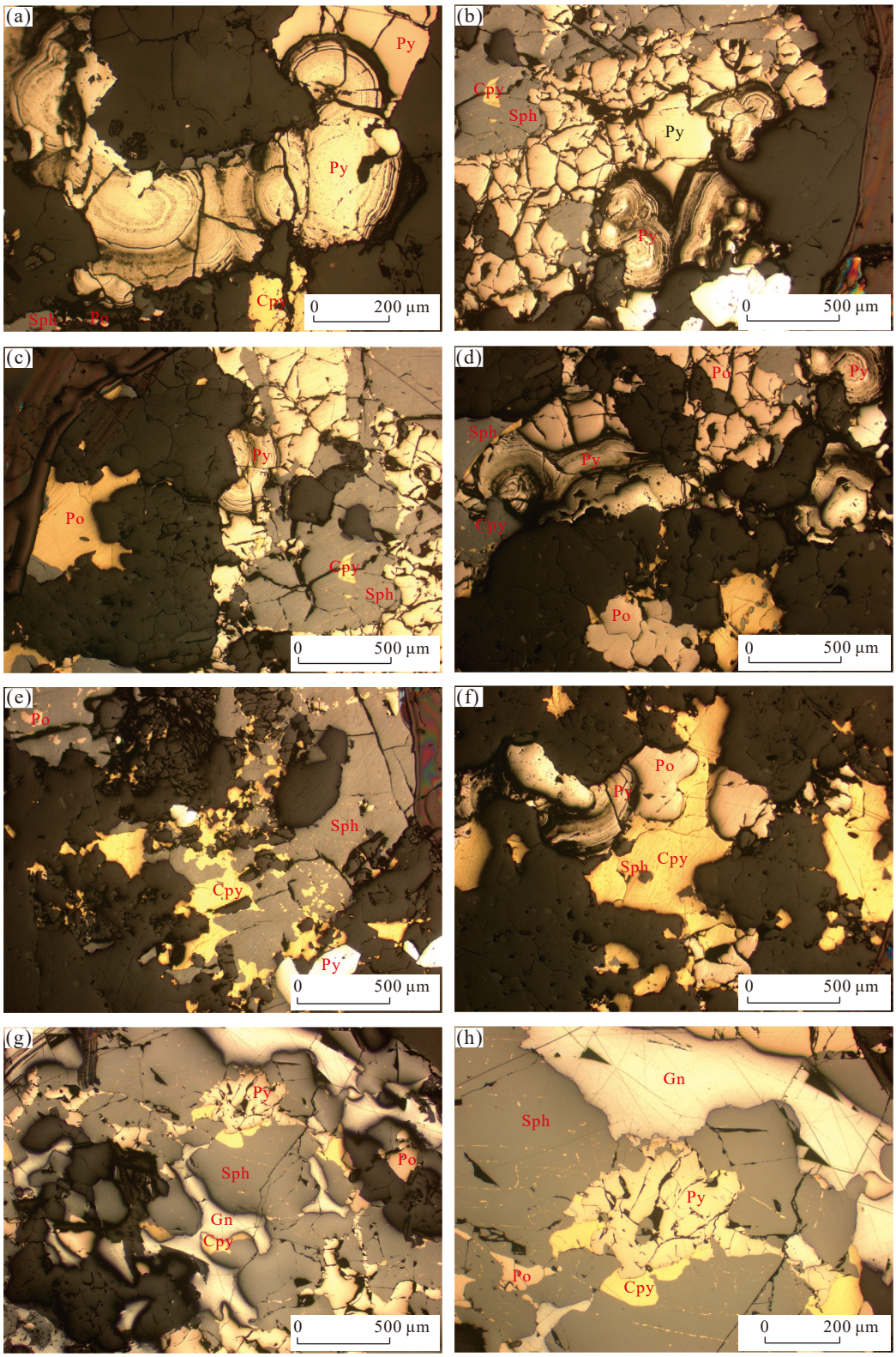


图2 库喀阿孜 Pb-Zn 多金属矿床简化地质图(a)和沿勘探线 A3 的地质剖面图(b; 据 Leng et al., 2019 修改)

Fig. 2 (a)Simplified geological map of the Kukaazi Pb-Zn polymetallic deposit and (b)geological profile along exploration line A3



a. 鲕状或胶状黄铁矿；b. 半自形–他形粒状黄铁矿；c. 他形粒状磁黄铁矿；d. 磁黄铁矿与闪锌矿共生；e. 黄铜矿与闪锌矿共生；f. 磁黄铁矿与黄铜矿共生；g. 他形的方铅矿与闪锌矿共生；h. 黄铜矿固溶体呈线性状分布于闪锌矿中；Cpy.黄铜矿；Gn.方铅矿；Po.磁黄铁矿；Py.黄铁矿；Sph.闪锌矿

图3　北矿段矿体典型矿石的显微镜下照片

Fig. 3　Microscopic views of typical ores from the orebody in the North Block

石标本，呈灰黑色，浸染状构造。金属矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿（图 3）。黄铁矿呈黄白色，呈鲕状或胶状结构的颗粒较小（图 3a～图 3d），自形–半自形、他形粒状结构的颗粒较大，常与闪锌矿、黄铜矿共生（图 3b～图 3c）。磁黄铁矿呈暗黑铜色，表面呈褐锖色，主要为半自形–他形粒状、不规则状结构，常与闪锌矿、黄铜矿共生（图 3d～图 3f）。闪锌矿为他形粒状结构，其中多有乳滴状黄铜矿出溶，构成固溶体出溶结构，部分固溶体呈线性状之压溶结构（图 3g～图 3h）。黄铜矿为他形粒状，呈乳浊状包裹于闪锌矿中，与磁黄铁矿、闪锌矿共生（图 3e）。方铅矿为他形结构，与闪锌矿共生（图 3g～图 3h）。

黄铁矿与磁黄铁矿样品制备及分析测试工作，均在澳大利亚塔斯马尼亚大学 CODES 中心完成。通过将代表性样品切片后灌胶固化成环氧树脂圆靶，在光学显微镜下详细鉴定其矿相学特征，理清黄铁矿和磁黄铁矿的生成期次，挑选用于分析的矿物颗粒并圈定分析位置。元素含量检测采用配备 213 nm 激光探针的 Agilent 4 500 四极杆质谱仪。激光剥蚀过程中，使用 0.7 L/min 高纯氦气将剥蚀产物带离剥蚀舱，立刻同 1.23 L/min 氩气均匀混合，随后进入质谱系统进行分析。激光剥蚀采用标样为 STDGIL-2b2（Danyushevsky et al., 2011），具体实验条件可参考文献（Large et al., 2007; Danyushevsky et al., 2011）。测试元素包括 Ti、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Ag、Cd、Sn、Sb、Te、Gd、Tl、Pb、Bi、Hf、Ta 和 Au 共计 20 种。激光剥蚀点分析参数：束斑直径为 50 μm，重复频率为 5 Hz，能量密度为 4 J/cm^2。单点分析时长 90 s，含 30 s 背景信号采集和 60 s 的激光剥蚀测定值。原始数据依据 Longerich et al.（1996）标准流程处理，以黄铁矿与磁黄铁矿中 Fe 含量的理论值为内标。采用 SILLS 软件对原始信号图谱进行筛选与处理，输出最后分析结果，绝大多数元素测定误差值低于 15%。

4 分析结果

分析结果表明（表 1），黄铁矿以富 Ni（34.7×10^{-6}～56.6×10^{-6}，平均为 43.7×10^{-6}）、Se（40.3×10^{-6}～72.0×10^{-6}，平均为 49.1×10^{-6}），贫 Co（0.46×10^{-6}～1.31×10^{-6}，平均为 0.71×10^{-6}）、As（0.33×10^{-6}～137×10^{-6}）等元素为特征；Co/Ni 值极低（0.01～0.02），且 As/Sb 值为 0.55～101，平均值为 4.92。亲硫元素（Cu、Zn、Pb、As、Se、Te、Ag 和 Bi）、亲铁元素（Co、Ni、Sn）、Ti 和 Mn 含量也都高于检测限，而 Gd、Hf、Ta、Ti、Au 等元素含量则多数低于检测限或者位于检测限附近。

磁黄铁矿相对于黄铁矿，显著富集 Co（0.57×10^{-6}～370×10^{-6}）、Ni（33.7×10^{-6}～426×10^{-6}），而贫 As（BDL～1.75×10^{-6}）；Co/Ni 值主要集中于 0.02～0.67 和 1.58～1.74 两个区间（表 2）。亲硫元素（Cu、Pb、Zn、Se、Te、Ag 和 Bi）、亲铁元素（Co、Ni、Sn）以及 Ti 和 Mn 的含量大多数都在检测限之上，而其他元素的含量则多数低于检测限或者位于检测限附近。

磁黄铁矿的 Co、Ni 平均含量显著高于黄铁矿（约 1～2 个数量级），而黄铁矿的 Zn、Sb、Tl 含量明显高于磁黄铁矿，As、Pb、Bi 含量略高于磁黄铁矿，二者的 Ti、Mn、Cu、Se、Ag、Cd、Sn、Te 元素含量差别不大，均普遍低于 10×10^{-6}（图 4）。

5 讨论

5.1 微量元素的赋存形式

矿物中微量元素的赋存形式主要有 3 种：①以类质同象进入矿物晶格中；②以可见微米级的微细矿物包裹体形式进入矿物中；③以不可见的纳米级矿物微粒形式，进入矿物的晶格缺陷中（冷成彪等，2017）。关于黄铁矿中各微量元素的赋存状态，包括其结合方式、置换元素类型及晶格占位机制等问题，目前已有研究通过 LA-ICP-MS 的信号图及元素空间耦合关系分析获得明确认识（Zhao et al., 2011）。一般来说，若某元素的信号强度随剥蚀时间呈现平缓的直线，无“尖峰”信号显示，则表明该元素在黄铁矿中主要以类质同象的形式存在（张红雨等，2022）。如果某元素在时间分辨信号谱图上出现峰值，表现为起伏波动较大的不规则曲线，说明该元素在黄铁矿中以微米级矿物包裹体的形式存在。对于以纳米级矿物微粒形式存在的微量元素，需要结合高分辨率透射电镜等微区成像技术相关手段进行综合判断。研究表明，Co、Ni、As、Mn、Se 等元素常以固溶体形式均匀分布在黄铁矿内部，其输出信号较平缓；Cu、Pb、Zn、Sb、Au、Ag 等元素常以微细矿物包裹体形式存在，表现为波动不规则的曲线（Large et al., 2007; 冷成彪等，2017）。

北矿段矿体黄铁矿的微量元素组成变化范围相对较小（表 1），通过 LA-ICP-MS 输出的剥蚀曲线图谱

发现(图 5a～图 5b), Co、Ni、Mn、As、Se 元素输出曲线整体较平缓, 且与 Fe 的峰谱分配形式一致, 表明这 5 种元素可能主要以类质同象形式存在于黄铁矿中。其中, 由于 Co 和 Ni 是强亲铜元素, 优先进入黄铁矿的晶格结构中替代 Fe, As 和 Se 是亲硫元素替代 S。值得一提的是, Pb、Bi 在黄铁矿中的剥蚀信号相当平坦, 没有表现出明显波动起伏的曲线, 且 Pb 和 Bi 呈现出明显的正相关关系(图 6a), 考虑到 Pb^{2+}和 Bi^{3+}的离

表 1　黄铁矿的 LA-ICP-MS 微量元素组成(10^{-6})

Tab. 1　Trace element composition (10^{-6}) of pyrite determined by LA-ICP-MS

样品点号	Ti	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Gd	Tl	Pb	Bi	Co/Ni	As/Sb
YL2-12-C1-Py1	0.64	16.5	0.46	44.8	0.09	21.3	3.96	40.3	1.26	0.62	0.13	0.12	0.14	0.03	0.02	13.4	3.62	0.01	33.8
YL2-12-C2-Py1	0.60	15.7	0.54	34.7	0.07	0.90	2.34	42.8	0.43	—	0.12	2.22	0.14	0.02	9.84	0.48	0.84	0.02	1.05
YL2-12-C2-Py2	0.65	17.5	0.57	42.5	0.05	8.53	0.33	44.8	0.24	0.09	0.09	0.02	0.10	0.03	0.00	0.57	0.66	0.01	21.2
YL2-12-C2-Py3	0.68	6.40	0.78	48.8	0.09	18.5	1.56	59.8	0.62	0.44	0.52	0.02	0.12	0.04	—	38.5	1.66	0.02	101
YL2-12-C2-Py4	0.62	13.4	0.57	40.2	0.07	12.8	1.12	42.6	0.84	0.16	0.13	0.29	—	0.03	0.04	3.21	1.53	0.01	3.88
YL2-12-C2-Py5	0.70	5.60	0.71	47.9	0.41	16.2	2.13	48.6	0.90	0.37	0.39	0.04	0.12	0.03	0.00	13.2	3.03	0.01	47.9
YL2-12-C3-Py1	0.60	14.5	0.61	39.5	0.06	0.88	50.9	41.7	1.71	0.02	0.13	48.2	0.15	0.01	62.7	2.30	2.72	0.02	1.06
YL2-12-C3-Py2	0.82	12.9	0.78	48.9	0.16	24.2	1.03	47.4	0.78	0.33	0.19	0.17	0.13	0.06	0.02	9.69	3.18	0.02	6.23
YL2-12-C3-Py3	0.91	8.58	0.91	47.2	0.17	52.0	6.22	65.7	1.41	0.73	0.62	0.33	0.13	0.05	0.06	45.8	7.12	0.02	18.7
YL2-12-C4-Py1	1.10	17.9	0.68	42.2	0.05	5.49	49.9	44.8	0.65	0.02	0.18	37.7	—	0.03	11.6	0.43	0.65	0.02	1.32
YL2-12-C4-Py2	1.05	4.29	1.31	56.6	0.53	7.71	5.51	72.0	1.33	0.26	0.50	0.17	0.17	0.07	0.02	24.1	6.11	0.02	32.2
YL2-12-C4-Py3	0.84	40.6	0.67	35.5	—	0.65	137	45.3	0.60	—	0.22	248	—	0.01	30.7	1.00	1.49	0.02	0.55
YL2-12-C4-Py4	0.72	15.1	0.66	39.1	—	5.77	16.6	42.6	0.55	—	0.12	3.37	—	0.02	0.92	0.75	1.39	0.02	4.92
平均值	0.76	14.5	0.71	43.7	0.16	13.5	21.4	49.1	0.87	0.30	0.26	26.2	0.13	0.03	9.66	11.8	2.62	0.02	4.92
标准偏差	0.16	8.75	0.21	5.90	0.15	13.5	37.5	9.71	0.42	0.23	0.18	65.8	0.02	0.02	18.2	14.7	1.96	0.00	27.5

注：“—”代表分析值低于仪器检测限(BDL)。

表 2　磁黄铁矿的 LA-ICP-MS 微量元素组成(10^{-6})

Tab. 2　Trace element composition (10^{-6}) of pyrrhotite determined by LA-ICP-MS

样品点号	Ti	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Tl	Pb	Bi	Co/Ni
YL2-12-C1-Po1	0.59	1.40	0.71	33.7	—	0.39	—	49.3	0.51	—	0.19	—	—	—	0.46	0.74	0.02
YL2-12-C3-Po1	—	2.26	0.57	34.1	—	0.21	—	57.5	0.72	—	0.20	—	—	—	0.40	0.54	0.02
YL2-12-C3-Po2	0.49	1.03	0.88	34.4	1.01	2.33	1.75	53.8	3.90	0.06	0.23	0.06	—	0.01	7.25	9.10	0.03
YL2-12-C4-Po1	0.56	1.24	0.67	35.4	—	0.33	—	54.7	0.30	—	0.21	—	—	—	0.44	0.71	0.02
YL2-12-C4-Po2	0.38	1.38	0.60	37.0	0.25	0.25	—	60.1	0.68	—	0.23	—	0.25	0.01	0.55	1.04	0.02
YL3-12-C1-Po1	0.46	2.42	345	219	0.15	0.17	—	34.4	1.22	—	0.21	0.04	—	—	1.23	2.18	1.58
YL3-12-C1-Po1	0.45	5.01	325	186	—	0.17	—	31.1	1.40	—	0.20	0.04	0.21	—	2.55	4.97	1.74
YL3-12-C1-Po2	0.45	2.75	370	231	—	0.14	—	36.3	0.54	—	0.17	—	0.35	—	0.50	0.95	1.60
YL3-12-C1-Po2	0.44	2.24	366	213	0.24	0.18	—	36.4	1.01	—	0.20	0.03	—	—	1.00	1.98	1.72
YL3-14-C1-Po1	0.65	6.19	259	421	—	0.36	—	10.3	0.77	—	0.21	0.18	—	0.02	1.56	0.01	0.62
YL3-14-C1-Po2	0.60	6.50	281	426	—	0.24	—	11.2	0.58	—	0.21	0.09	0.25	—	1.01	0.01	0.66
YL3-14-C2-Po1	0.60	2.50	225	396	—	0.35	—	6.18	2.51	—	0.18	0.12	—	—	4.26	0.01	0.57
YL3-14-Po	0.49	5.67	267	400	—	0.34	—	9.92	0.37	—	0.22	0.03	—	—	0.51	—	0.67
平均值	0.51	3.12	188	205	0.41	0.42	1.75	34.7	1.12	0.06	0.20	0.07	0.26	0.01	1.67	1.85	0.71
标准偏差	0.08	1.91	153	156	0.35	0.56	0.00	19.1	0.98	0.00	0.02	0.05	0.05	0.00	1.93	2.56	0.68

注：“—”代表分析值低于仪器检测限(BDL)。

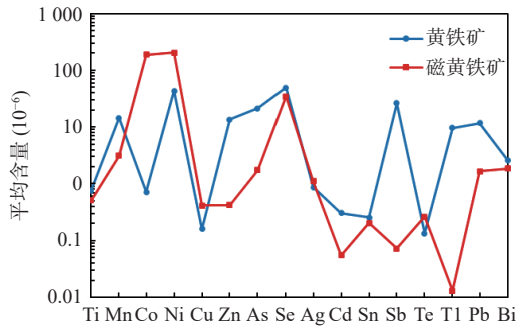


图4 北矿段矿体黄铁矿和磁黄铁矿微量元素变化图

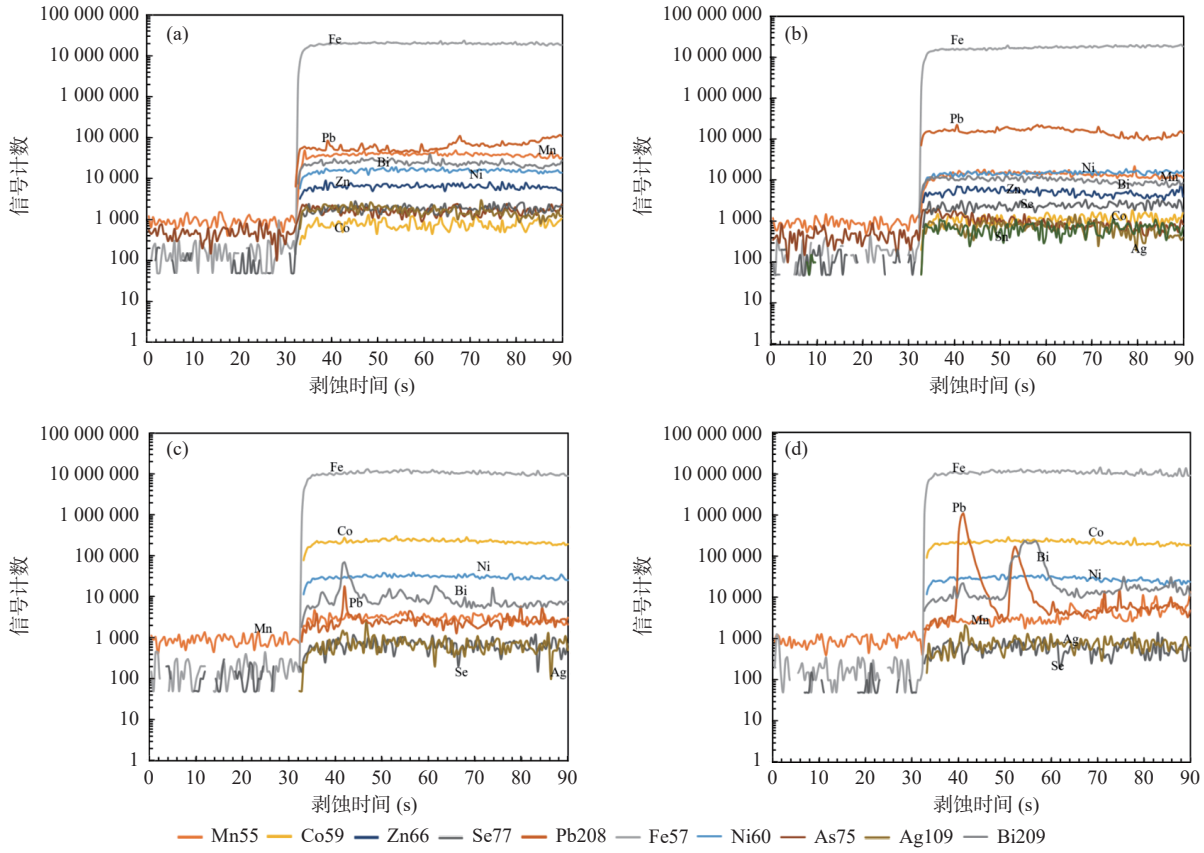
Fig. 4 Compositional variations of trace elements in pyrite and pyrrhotite from the orebody, North Block

子半径分别为 1.19 Å和 1.03 Å, Fe^{2+}的离子半径为 0.75 Å, 二者离子半径相差较大, 应该很难以类质同象的形式进入黄铁矿的晶格。因此, 推测 Pb 和 Bi 很可能是以纳米微粒的形式均匀地分布于黄铁矿之中。磁黄铁矿的微区微量元素组成变化范围相对较大(表 2), 但 Co、Ni、Mn 元素在 LA-ICP-MS 剥蚀信号剖面图中曲线较平缓(图 5c～图 5d), 说明这 3 种元素可能以类质同象的形式置换其中的 Fe。Pb、Bi 在信号剖面图中出现明显的峰值, 曲线上下波动起伏, 二者具有随时间共同变化的特征, 且磁黄铁矿中的 Pb 和 Bi 呈现出明显的正相关关系(图 6b), 暗示二者可能赋存于同一矿物中(方铅矿或含铋矿物), 并以显微包裹体的形式赋存于磁黄铁矿中。

5.2 矿床成因约束

Co、Ni 与 Fe 在地球化学过程中具有相似的地球化学行为, 在黄铁矿中 Co、Ni 以类质同象的形式替换其中的 Fe(杜亚龙等, 2017), Co、Ni 含量的变化又主要受到黄铁矿沉淀时的物理化学条件的控制。因此, 黄铁矿中 Co、Ni 含量及 Co/Ni 值可用其来探讨黄铁矿的形成环境和矿床成因(宋学信等, 1986; 章守成等, 2016)。

前人研究表明, 黄铁矿中 Co 的含量与其结晶温度呈正相关关系(Zhang et al., 2018)。一般来说, 根据 Co 的含量差异, 黄铁矿可划分为低温型(<100×10^{-6})、中温型(100×10^{-6}～1 000×10^{-6})及高温型(>1 000×10^{-6};



a.YL2-12-C1-Py1; b.YL2-12-C2-Py3; c.YL3-12-C1-Po1; d.YL3-12-C1-Po1

图5 北矿段矿体代表性黄铁矿和磁黄铁矿 LA-ICP-MS 剥蚀信号剖面图

Fig. 5 The representative single-spot LA-ICP-MS spectra for selected elements in pyrite and pyrrhotite from the north block

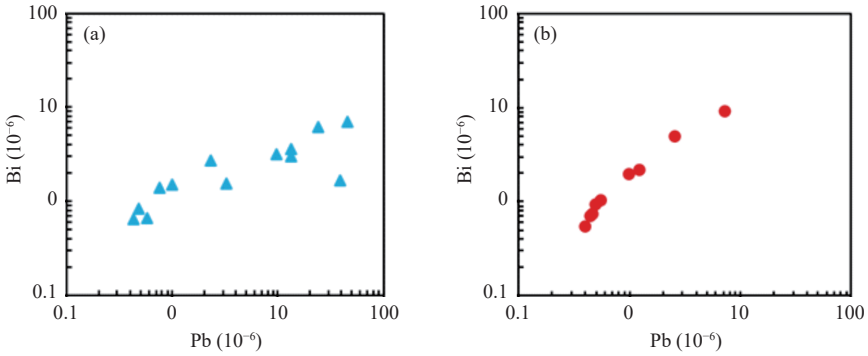


图6　黄铁矿(a)和磁黄铁矿(b)Pb-Bi 二元协变图

Fig. 6　Pb-Bi binary plots for (a) pyrite and (b) pyrrhotite

梅建明, 2000)。分析结果显示, 黄铁矿 Co 含量为 0.46×10^{-6}～1.31×10^{-6}, 均低于 100×10^{-6}, 表明该区黄铁矿为低温成矿作用的产物。

Ni 的沉淀速率通常低于 Fe, 在黄铁矿结晶过程中优先占据晶格位置, 并且在还原环境下活动性差。因此, 黄铁矿中 Ni 含量可以用来示踪成矿流体的信息(赵海香等, 2009)。基性、超基性岩石通常富含 Ni, 但酸性岩 Ni 含量通常偏低。本实验中黄铁矿的 Ni 含量均较低(34.7×10^{-6}～56.6×10^{-6}, 平均为 43.7×10^{-6}), 表明可能为酸性岩的流体来源。Leng et al.(2018)从北矿段矿体矿石中选取了 4 件辉钼矿样品进行 Re-Os 同位素测年, 结果表明其形成年代为(450.5±6.4) Ma(2σ, MSWD=0.057), 这可能说明辉钼矿成矿与奥陶纪花岗岩侵入有关(Leng et al., 2018)。黄铁矿中 Ni 的含量表明酸性的成矿流体来源也从侧面得到验证。

据宋学信等(1986)等统计, 沉积成因的黄铁矿 Co/Ni 值最低, 为 0.01～0.5; 层控型(沉积–改造型)黄铁矿的 Co/Ni 值亦较低, 通常小于 1 或接近于 1; 斑岩型矿床黄铁矿 Co/Ni 值略高, 一般为 1.1～4.6; 矽卡岩型铁矿床因含 Co 较高, 其 Co/Ni 值相当高, 为 3～23.5; 但矽卡岩型铅锌矿床比值与斑岩型矿床相似, 为 2.7～3.06; 热液型黄铁矿的 Co/Ni 值较高, 一般为 1.2～32。本研究中黄铁矿的 Co、Ni 含量均较低, 变化范围较小, Co/Ni 值 0.01～0.02(图 7), 反映出矿床的成矿温度较低, 表明其为沉积成因。Cu、Sn 等微量元素主要在高温流体中富集, 高温流体中结晶的黄铁矿均明显富集这些元素(Zhang et al., 2018)。北矿段矿体黄铁矿具有极低的 Cu、Sn 含量($<1\times10^{-6}$), 也进一步表明其结晶温度较低。此外, 黄铁矿的 As/Sb 值可以指示流体沸腾作用(Schaarschmidt et al., 2021), 当黄铁矿中的 As/Sb>20 时, 认为黄铁矿是在沸腾的流体环境中沉淀; 当 As/Sb<20 时, 表示流体已经历过沸腾作用, 沉淀时温度已降低。北矿段矿体中黄铁矿 As/Sb 值为 0.55～101.27, 平均值为 4.92, 小于 20, 表明其在温度较低的环境中沉淀。

一般来说, 沉积黄铁矿具有较高的 Sb/Bi 值, 浅成低温热液成因的黄铁矿 Sb/Bi 值相对较低(韩亮等, 2021)。北矿段矿体的黄铁矿微量元素组成大部分点落入浅成低温黄铁矿范围(图 8), 少部分处于沉积黄铁矿区域。考虑到北矿段矿体中发育较多胶状黄铁矿、竹叶状黄铁矿, 也存在一些自形–半自形粒状结构的黄铁矿, 这表明该矿区至少存在两期黄铁矿, 而胶状黄铁矿、竹叶状黄铁矿可能就形成于与海底火山作用有关的热水沉积作用。结合前人(Zhang et al., 2014)研究成果, 提出库喀阿孜矿床存在两期成矿阶段, 且早期热水沉积作用受到晚期岩浆热液的影响, 从而导致黄铁矿微量元素的变化。

目前, 众多学者对硫化物矿床黄铁矿中微量元素

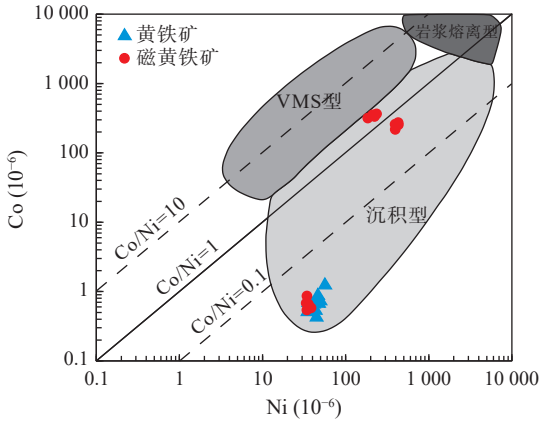


图7　北矿段矿体黄铁矿和磁黄铁矿的 Co-Ni 协变图
(底图据冷成彪, 2017 修改)

Fig. 7　Co-Ni covariation diagram for pyrite and pyrrhotite from the orebody, North Block

的组成和比值对矿床成因的约束有着基本的共同认识，但关于磁黄铁矿中 Co、Ni 等微量元素的成因意义尚缺乏深入研究。对于库喀阿孜矿区北矿段矿体而言，磁黄铁矿 Co 和 Ni 根据其含量的差异大致可以分为两组（图 7）：第一组为 YL2 样品：Co 含量极低 0.57×10^{-6}～0.88×10^{-6}，均值为 0.69×10^{-6}，对应的 Ni 含量高 33.73×10^{-6}～36.95×10^{-6}，均值为 34.92×10^{-6}（表 2），表明磁黄铁矿形成于一个低温的环境条件。因为低温限制了 Co 类质同象替代 Fe 的效率和流体携带 Co 的能力，导致 Co 难以进入磁黄铁矿晶格；而在低温条件下，Ni^{2+}相对于 Co^{2+}更容易进入磁黄铁矿晶格，富集特征更明显，且 Co/Ni 值远小于 1，这表明在沉积成岩作用下形成的磁黄铁矿与黄铁矿可能具有相似的 Co、Ni 含量，均受到沉积时海水的物理化学条件控制。第二组为 YL3 样品：Co 含量为 225×10^{-6}～370×10^{-6}，均值为 305×10^{-6}（表 2），暗示在高温条件下，Co^{2+}与 Fe^{2+}的离子半径和化学性质更为接近，类质同象替代更容易发生。高温流体会从深部岩浆或围岩中活化萃取更多的 Co，导致 Co 的含量大幅度升高。第二组前 4 个点的 Co/Ni 值稳定在 1.60 左右，后 4 个点虽然 Ni 含量升高导致比值略有下降，但全部大于 0.5，且平均值高于 1，暗示有一期强烈的岩浆–热液事件（可能是花岗岩侵入体）叠加改造了早期的矿化。这期热液事件带来了富 Co 的流体，形成了第二组特征的磁黄铁矿，这期事件很可能是主成矿期。

此外，Se 在磁黄铁矿中的行为是一个极其灵敏的地球化学“示踪剂”，它能提供关于成矿流体来源、氧化还原条件和形成环境的独特信息（赵振华，1997）。

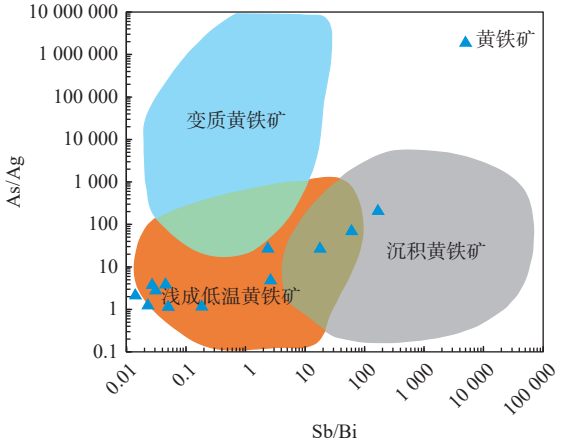


图8 北矿段矿体黄铁矿的 As/Ag-Sb/Bi 图解（底图据韩亮等，2021 修改）

Fig. 8 As/Ag vs. Sb/Bi binary diagram for pyrite from the ore-body, North Block

在低温条件下，Se^{2-}和 S^{2-}的离子半径差异效应减弱，使得 Se 更容易替代 S 进入硫化物晶格（Ye et al., 2011）。北矿段矿体的磁黄铁矿中（图 9），第一组磁黄铁矿的 Se 含量极高（49.26×10^{-6}～60.05×10^{-6}），这与其极低的 Co/Ni 值相结合，指示了一个低温的沉积环境。而第二组磁黄铁矿的 Se 含量显著降低（6.18×10^{-6}～36.44×10^{-6}），与其高的 Co/Ni 值一起，共同指向了岩浆–热液成因。Se 含量的巨大差异表明两期成矿事件的流体来源完全不同。

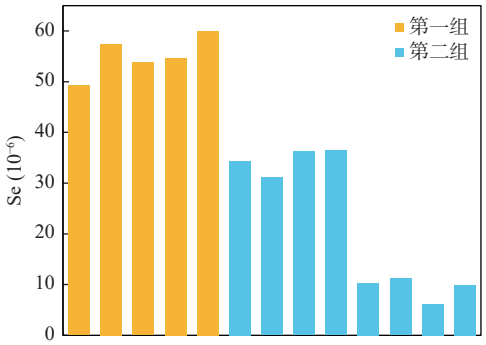


图9 磁黄铁矿中第一组与第二组 Se 含量对比柱状图

Fig. 9 Comparative bar chart of Se content between group 1 and group 2 in pyrrhotite

6 结论

（1）Co、Ni、Mn、Se 在黄铁矿中以类质同象形式均匀分布，而 Pb、Bi 以纳米级微粒赋存于晶格缺陷；磁黄铁矿中 Pb、Bi 则与微米级方铅矿或含铋矿物包裹体相关。

（2）黄铁矿具极低 Co/Ni 值（0.01～0.02）、低 Co（$<1.31\times10^{-6}$）、高 Ni（均值 43.7×10^{-6}）的特征，与沉积成因黄铁矿一致。磁黄铁矿 Co/Ni 比值分异明显：主体低比值（0.02～0.03）与黄铁矿沉积成因匹配，局部高比值（0.57～1.74）及异常高 Co（$>300\times10^{-6}$）反映晚期热液叠加。

（3）黄铁矿的 Co/Ni 值、低温元素组合及 Sb/Bi 图解共同指示早期海底热水沉积成矿；磁黄铁矿高 Co/Ni 样品暗示晚期岩浆热液对先存矿体的改造富集。

利益冲突声明（Conflict of Interests）：

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

丁坤, 梁婷, 周义, 等. 西昆仑大红柳滩黑云母二长花岗岩岩石成因: 来自锆石 U-Pb 年龄及 Li-Hf 同位素的证据[J]. 西北地质, 2020, 53(1): 24−34.

DING Kun, LIANG Ting, ZHOU Yi, et al. Petrogenesis of Dahongliutan Biotite Monzogranite in Western Kunlun Orogen: Evidence from Zircon U-Pb Age and Li-Hf Isotope[J]. Northwestern Geology, 2020, 53(1): 24−34.

杜亚龙, 李智明, 王继斌, 等. 新疆西天山卡特巴阿苏金矿黄铁矿地球化学特征及地质意义[J]. 西北地质, 2017, 50(1): 239−248.

DU Yalong, LI Zhiming, WANG Jibin, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the pyrites from the Katbasu Au deposit in west Tianshan, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2017, 50(1): 239−248.

韩亮, 丁俊英, 范明森, 等. 江南造山带中段正冲金矿矿床成因: 来自流体包裹体和黄铁矿微量元素的证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(2): 382−399.

HAN Liang, DING Junying, FAN Mingsen, et al. Genesis of the Zhengchong gold deposit in the central part of the Jiangnan orogenic belt: Evidences from fluid Inclusions and trace elements of pyrite[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(2): 382−399.

冷成彪. 滇西北红山铜多金属矿床的成因类型: 黄铁矿和磁黄铁矿 LA-ICPMS 微量元素制约[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 162−175.

LENG Chengbiao. Genesis of Hongshan Cu polymetallic large deposit in the Zhongdian area, NW Yunnan: constraints from LA-ICPMS trace elements of pyrite and pyrrhotite[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(6): 162−175.

梅建明. 浙江遂昌治岭头金矿床黄铁矿的化学成分标型研究[J]. 现代地质, 2000, (1): 51−55.

MEI Jianming. Chemical typomorphic characteristic of pyrites from Zhilingtou gold deposit, Suichang, Zhejiang[J]. Geoscience, 2000, (1): 51−55.

宋学信, 张景凯. 中国各种成因黄铁矿的微量元素特征 [A]. 中国地质科学院矿床地质研究所文集 (18)[C]. 矿床地质研究所, 1986: 175−184.

孙海田, 李纯杰, 吴海, 等. 西昆仑金属成矿省概论 [M]. 北京: 地质出版社, 2003:255.

汪玉会, 冷成彪, 张兴春. 新疆叶城县库喀阿孜铅-锌-(铜-钨) 多金属矿区中-酸性侵入岩元素地球化学和年代学初步研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(6): 736−745.

WANG Yuhui, LENG Chengbiao, ZHANG Xingchun. A preliminary study on elemental geochemistry and geochronology of intermediate-acidic intrusive rocks from the Kukaazi Pb-Zn- (Cu-W) polymetallic deposit, Yecheng County, Xinjiang[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(6): 736−745.

陶再礼, 尹继元, 袁超, 等. 西昆仑造山带晚奥陶世侵入岩的岩石成因: 对原特提斯洋俯冲过程的制约[J]. 岩石学报, 2022, 38(11): 3321−3340.

TAO Zaili, YIN Jiyuan, YUAN Chao, et al. Petrogenesis of Late Ordovician intrusive rocks in the West Kunlun orogenic belt: Constraints on the subduction process of the Proto-Tethys Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(11): 3321−3340.

许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1−22.

XU Zhiqin, LI Sitian, ZHANG Jianxin, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 1−22.

张红雨, 赵青青, 赵刚, 等. 黄铁矿微量元素 LA-ICP-MS 原位微区分析方法及其在金矿床研究中的应用[J]. 矿床地质, 2022, 41(6): 1182−1199.

ZHANG HongYu, ZHAO Qingqing, ZHAO Gang, et al. In situ LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite and its application in study of Au deposit[J]. Mineral Deposits, 2022, 41(6): 1182−1199.

章守成, 王文挺, 方德, 等. 黄铁矿 LA-ICP-MS 原位测试与分析[J]. 现代矿业, 2016, 32(9): 195−198.

ZHANG Shoucheng, WANG Wenting, FANG De, et al. In situ LA-ICP-MS testing and analysis of pyrite[J]. Modern Mining, 2016, 32(9): 195−198.

赵海香, 蒋少涌, Hartwig E. Frimmel, 等. 小秦岭金矿中黄铁矿微量元素原位 LA-ICPMS 分析及其对矿床成因的指示意义[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 361−362.

ZHAO Haixiang, JIANG Shaoyong, Hartwig E. Frimmel, et al. In situ LA-ICP-MS trace-element analysis of pyrite from the Xiaoqinling gold district: implications for ore genesis[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(S1): 361−362.

赵振华. 微量元素地球化学原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 238.

Chao W, Liang L, Shiping H, et al. Early Paleozoic magmatism in west Kunlun: Constraints from geochemical and zircon U-Pb-Hf isotopic studies of the Bulong granite[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(4): 997−1014.

Danyushevsky L, Robinson P, Gilbert S, et al. Routine quantitative multi-element analysis of sulphide minerals by laser ablation ICP-MS: Standard development and consideration of matrix effects[J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2011, 11(1): 51−60.

Jia R Y. Petrogenesis and tectonic implications of Qiukesugranite pluton and its enclaves in the western Kunlun Orogen Belt, NW China[D]. Dissertation for master's degree of Nanjing University, 1–62, 2013.

Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: implications for granitoid

geneses[J]. Lithos, 2002, 63(3-4): 165−187.

Koglin N, Frimmel H E, Lawrie Minter W E, et al. Trace-element characteristics of different pyrite types in Mesoarchaean to Palaeoproterozoic placer deposits[J]. Mineralium Deposita, 2010, 45: 259−280.

Large R R, Maslennikov V V, Robert F, et al. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena gold province, Russia[J]. Economic Geology, 2007, 102(7): 1233−1267.

Leng C B , Wang Y H, Zhang X C, et al. Constraints of molybdenite Re–Os and scheelite Sm–Nd ages on mineralization time of the Kukaazi Pb–Zn–Cu–W deposit, Western Kunlun, NW China[J]. Acta Geochimica, 2018, 37(1): 47−59.

Leng C B , Wang W , Ye L , et al. Genesis of the late Ordovician Kukaazi Pb-Zn deposit in the western Kunlun orogen, NW China: New insights from in-situ trace elemental compositions of base metal sulfides[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 184103995−103995.

Longerich H P, Jackson S E, Günther D. Inter-laboratory note. Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometric transient signal data acquisition and analyte concentration calculation[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1996, 11(9): 899−904.

Mattern F, Schneider W. Suturing of the Proto-and Paleo-Tethys oceans in the western Kunlun (Xinjiang, China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2000, 18(6): 637−650.

Schaarschmidt A, Haase K M, Klemd R, et al. Boiling effects on trace element and sulfur isotope compositions of sulfides in shallow-marine hydrothermal systems: Evidence from Milos Island, Greece[J]. Chemical Geology, 2021, 583: 120457.

Ulrich T, Long D G F, Kamber B S, et al. In situ trace element and sulfur isotope analysis of pyrite in a Paleoproterozoic gold placer deposit, Pardo and Clement Townships, Ontario, Canada[J]. Economic Geology, 2011, 106(4): 667−686.

Xiao W J, Windley B F, Chen H L, et al. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan Plateau[J]. Geology, 2002, 30(4): 295−298.

Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, et al. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: a Paleozoic–Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia[J]. The Journal of Geology, 2005, 113(6): 687−705.

Xiao W, Han F, Windley B F, et al. Multiple accretionary orogenesis and episodic growth of continents: Insights from the Western Kunlun Range, central Asia[J]. International Geology Review, 2003, 45(4): 303−328.

Ye L, Cook N J, Ciobanu C L, et al. Trace and minor elements in sphalerite from base metal deposits in South China: A LA-ICPMS study[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 39(4): 188−217.

Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28(1): 211−280.

Yin J, Xiao W, Sun M, et al. Petrogenesis of Early Cambrian granitoids in the western Kunlun orogenic belt, Northwest Tibet: Insight into early stage subduction of the Proto-Tethys Ocean[J]. Bulletin, 2020, 132(9-10): 2221−2240.

Yuan C, Sun M, Xiao W J, et al. Subduction polarity of the Prototethys: Insights from the Yirba pluton of the western Kunlun range, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19(3): 399−408.

Yuan C, Sun M, Zhou M F, et al. Geochemistry and petrogenesis of the Yishak volcanic sequence, Kudi ophiolite, West Kunlun (NW China): implications for the magmatic evolution in a subduction zone environment[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 150(2): 195−211.

Zhang C L, Lu S N, Yu H F, et al. Tectonic evolution of the Western Kunlun orogenic belt in northern Qinghai-Tibet Plateau: Evidence from zircon SHRIMP and LA-ICP-MS U-Pb geochronology[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2007, 50(6): 825−835.

Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. Tectonic evolution of the West Kunlun Orogenic Belt along the northern margin of the Tibetan Plateau: Implications for the assembly of the Tarim terrane to Gondwana[J]. Geoscience Frontiers, 2019, 10(3): 973−988.

Zhang C L, Zou H B, Ye X T, et al. Timing of subduction initiation in the Proto-Tethys Ocean: Evidence from the Cambrian gabbros from the NE Pamir Plateau[J]. Lithos, 2018, 314: 40−51.

Zhang X C, Wang Y H, Leng C B, et al. Geology, Sulfur isotopes and scheelite Sm-Nd age of the Kukaazi Pb-Zn-(Cu-W) polymetallic deposit, Yecheng County, Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2014, 88(supp.2): 244−246.

Zhang X, Zhai S K, Yu Z H, et al. Mineralogy and geological significance of hydrothermal deposits from the Okinawa Trough[J]. Journal of Marine Systems, 2018, 180: 124−131.

Zhang Y, Niu Y L, Hu Y, et al. The syncollisional granitoid magmatism and continental crust growth in the West Kunlun Orogen, China–Evidence from geochronology and geochemistry of the Arkarz pluton[J]. Lithos, 2016, 245: 191−204.

Zhao H X, Frimmel H E, Jiang S Y, et al. LA-ICP-MS trace element analysis of pyrite from the Xiaoqinling gold district, China: implications for ore genesis[J]. Ore Geology Reviews, 2011, 43(1): 142−153.