新疆库喀阿孜多金属矿床成矿物质来源及矿床成因：S-Pb同位素证据

齐晗冀[1]，张兴春[2]，汪玉会[2,3*]，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关键矿产成矿与预测全国重点实验室，贵州 贵阳 550081；
3.贵州省地质矿产中心实验室，贵州 贵阳 550018

摘 要：针对新疆叶城县库喀阿孜矿床的成矿物质来源与矿床成因类型尚不明确的问题，通过对KⅠ和KⅡ矿段的金属硫化物开展S同位素分析，对金属硫化物、赋矿围岩和侵入岩开展Pb同位素分析，结合矿床地质特征，探讨了该矿床的成矿物质来源与成因机制。S同位素分析结果表明：金属硫化物的$\delta^{34}S$值为2.0‰~12.1‰（平均值为7.8‰），变化范围较大，呈现多峰分布特征，铜铁硫化物阶段形成的磁黄铁矿$\delta^{34}S$值较低（平均值为3.5‰），接近幔源硫特征，铅锌硫化物阶段的方铅矿和闪锌矿$\delta^{34}S$值较高（平均值为10.3‰），指示不同成矿阶段的成矿物质来源发生了变化。Pb同位素分析结果表明：金属硫化物的$^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$和$^{208}Pb/^{204}Pb$比值分别为18.394~18.733、15.591~15.782和38.125~38.743，组成较为均一，与侵入岩的Pb同位素组成较为相似，而与赋矿围岩的Pb同位素组成差异显著，指示成矿物质由与长英质侵入岩浆有关的岩浆热液和深部变质结晶基底共同提供。金属硫化物的μ值为9.44~9.80（平均值为9.54），ω值为34.54~38.13（平均值为35.68），Th/U值为3.53~3.77（平均值为3.62），指示成矿物质是以地壳为主的壳幔混合来源。综合矿床地质特征和同位素特征，认为库喀阿孜多金属矿床为一处与海底火山活动有关的远端矽卡岩型铜铅锌多金属矿床。

关键词：S-Pb同位素；成矿物质来源；矿床成因；库喀阿孜多金属矿床；西昆仑造山带

中图分类号：P618.51 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-2518（2026）04-0836-15 DOI：10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.316

引用格式：齐晗冀，张兴春，汪玉会，等.新疆库喀阿孜多金属矿床成矿物质来源及矿床成因：S-Pb同位素证据[J].黄金科学技术，2026，34（4）：836-850.QI Hanji，ZHANG Xingchun，WANG Yuhui，et al.Source of Ore-forming Materials and Genesis of the Kukaazi Polymetallic Deposit in Xinjiang：Evidence from S-Pb Isotopes[J].Gold Science and Technology，2026，34（4）：836-850.

西昆仑造山带作为青藏高原北缘的重要组成部分，西接帕米尔造山带，东连东昆仑造山带，是我国极具潜力的多金属成矿带之一。近20年来，该区域在铅、锌、铜和钨等战略矿产勘查中取得了一系列突破性进展（孙海田等，2003；汪玉会等，2013；Zhang et al，2014；Leng et al，2018，2019；Zafar et al，2019）。目前，区内已发现的矿床成因类型多样，主要包括：（1）火山块状硫化物（VHMS）型矿床，代表性矿床有阿克塔什和萨洛伊（孙海田等，2003）；（2）特殊的喷流沉积型碳酸盐岩多金属矿床（即“火烧云式”），以新疆和田火烧云超大型铅锌矿最为典型（董连慧等，2015）；（3）砂岩型铜矿；（4）与岩浆活动

收稿日期：2025-11-03；**修订日期**：2026-04-20
基金项目：国家自然科学基金项目“斑岩型矿床”（编号：42022021）资助
作者简介：齐晗冀（2002—），男，江西南昌人，硕士研究生，从事矿床学工作。E-mail：qhj020803@163.com
*通信作者：汪玉会（1988—），女，贵州遵义人，工程师，从事岩矿鉴定与基础地质研究工作。E-mail：526993136@qq.com
冷成彪（1982—），男，山东临沂人，教授，从事矿床学及地球化学的研究与教学工作。E-mail：lcb8207@163.com
© Editorial Department of *Gold Science and Technology*（CC BY-NC-ND）

密切相关的岩浆热液型矿床,如大同斑岩铜矿等(刘建平等,2010;王核等,2017)。这些多样化的矿床类型反映了西昆仑造山带复杂的构造演化历史和多元化的成矿动力学背景。

库喀阿孜多金属矿床是西昆仑造山带近年来发现的一处重要矿床,位于新疆叶城县境内。该矿床以铅、锌矿化为主,伴生Cu和W等多金属元素,成矿潜力较大。矿体主要呈透镜状或似层状赋存于中元古界长城系的灰白色条纹状大理岩、变硅质岩和白色粗晶大理岩的接触带或层间构造中。矿区主要有KⅠ、KⅡ和KⅢ共3个矿段,其中,KⅠ矿段以铜锌矿化为主,伴生Pb和W等元素;KⅡ矿段则以铅锌矿化为主,局部见磁铁矿化(汪玉会等,2013;Zafar et al,2019)。受地理位置偏远和交通不便等自然条件限制,该矿床前期地质基础工作相对薄弱,整体研究程度较低,关于库喀阿孜多金属矿床的成矿物质来源及成因机制,学术界尚存在较大争议。一方面,矿区周围岩浆岩发育,且矿床产于造山带环境,暗示其可能与岩浆热液活动有关;另一方面,其层状和似层状产出特征又暗示着沉积或喷流沉积成因。前人研究虽然对矿床地质特征进行了初步描述,但缺乏关键的地球化学示踪数据,特别是系统的Pb同位素组成研究尚未开展。Pb同位素作为追踪成矿物质来源、揭示成矿地质过程及限定矿床形成时代的有力工具(Lin et al,2011;Darling et al,2012;Pettke et al,2012;Bao et al,2016;Yuan et al,2016;Chen et al,2017;贾文彬等,2018),在解决此类成因争议中具有不可替代的作用。

鉴于此,为探明库喀阿孜多金属矿床的成矿物质来源并揭示其成因机制,本文在系统梳理库喀阿孜多金属矿床地质特征的基础上,重点针对KⅠ、KⅡ矿段的金属硫化物、赋矿围岩和侵入岩开展了详细的S、Pb同位素分析,利用Pb同位素组成示踪成矿金属的来源,结合S同位素特征判断硫的来源和成矿流体性质,结合地质与地球化学证据,约束矿床的成因类型,进一步深化对西昆仑造山带多金属成矿作用的认识。

1 区域地质背景

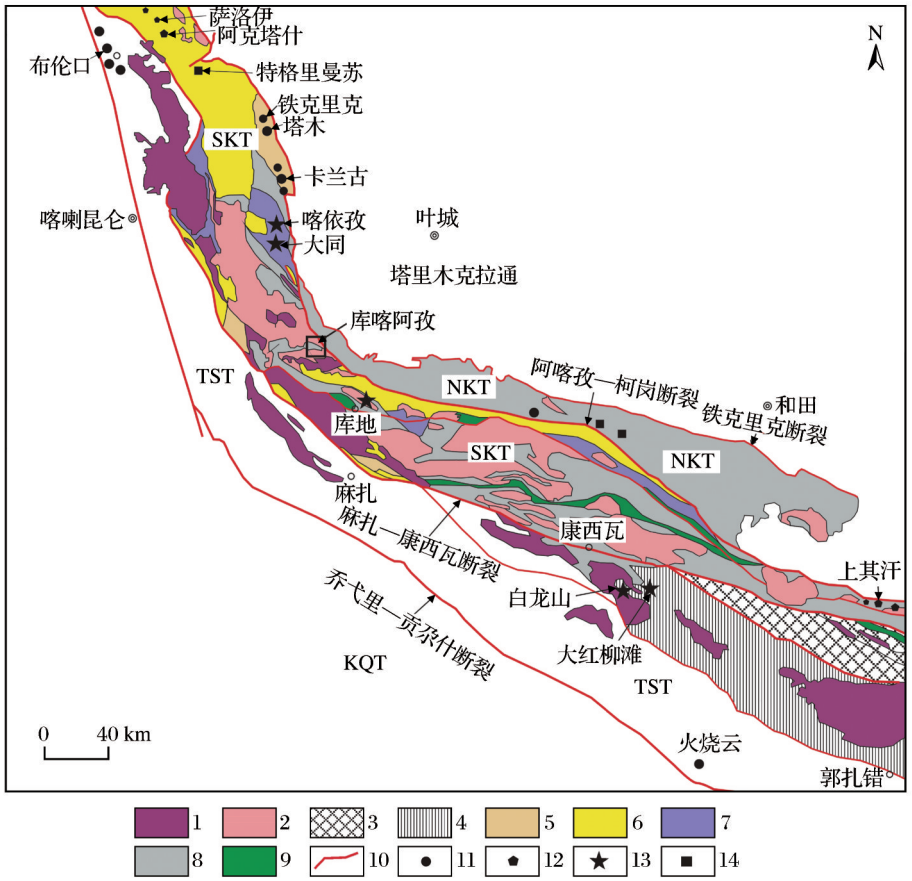
库喀阿孜多金属矿床位于塔里木盆地南缘的西昆仑造山带(丁道桂等,1996),该带处于古亚洲与特提斯构造域的交接部位,呈NW向延伸,是夹于塔里木克拉通与喀喇昆仑—羌塘地块(KQT)之间的一条褶皱带(许志琴等,2011;Zhang et al,2016)。西昆仑造山带可划分为4个构造单元,由北向南依次为北西昆仑地体(NKT)、南西昆仑地体(SKT)、甜水海—喀喇昆仑地体(TST)和喀喇昆仑—羌塘地体(KQT)(图1)(许志琴等,2011),这些地体被奥依塔格—库地缝合带、麻扎—康西瓦缝合带和红山湖—乔尔天山缝合带分割(Mattern et al,2000;Jiang et al,2002;Xiao et al,2002,2005;Zhang et al,2007),库喀阿孜多金属矿床的大地构造位置处于西昆仑中间地块及显生宙岩浆弧带(孙海田,2003)。

区内出露地层主要为中元古界长城系,此外还出露有古元古界、新元古界青白口系、志留系、石炭系和二叠系等地层单元,岩性以变玄武岩、变硅质岩夹变凝灰岩、绿泥石石英片岩、石英岩、变质硅岩和大理岩为主。区内岩浆活动强烈,出露的岩浆岩主要为元古宙、加里东期、华力西期和燕山期的中酸性侵入岩,岩性以钾长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩和二云母花岗岩为主,与变质岩呈侵入接触关系(汪玉会等,2013)。

区内构造活动强烈,发育有麻扎—康西瓦、乔戈里—贡尕什断裂、阿喀孜—柯岗和铁克里克4条主要断裂,这4条主要断裂带为区内重要的导矿构造,控制着区内矿床(点)的产出。

2 矿床地质特征

库喀阿孜多金属矿床围岩由灰白色条纹状大理岩、黑云母石英板岩、云母石英板岩、云母长石石英板岩、灰色凝灰质大理岩、变钙质凝灰岩、棕色变质凝灰质硅质岩、灰黑色变凝灰岩夹浅绿色硅质岩、黑灰色变凝灰岩、灰白色变流纹质凝灰岩、肉红色石榴子石矽卡岩、绿色透辉石岩、棕色钾长硅质岩和乳白色钠长石岩等组成(汪玉会等,2013),这些岩性因地层薄而无法完整显示出来。层理走向为160°~210°,倾角为60°~80°(图2和图3)(Leng et al,2019)。区内工程控制的矿体共有13个,主要以透镜状和似层状发育在中元古界长城系灰白色条纹状



NKT-北西昆仑地体;SKT-南西昆仑地体;TST-甜水海—喀喇昆仑地体;KQT-喀喇昆仑—羌塘地体;1.早中生代花岗岩;2.早古生代花岗岩;3.二叠纪火山岩和复理石;4.二叠—三叠纪复理石;5.中生代;6.晚古生代;7.早古生代;8.前寒武纪;9.蛇绿混合岩;10.断裂;11.硫酸盐岩容矿多金属矿床;12.火山块状硫化物矿床(VMS矿床);13.岩浆热液型矿床;14.砂岩型铜矿床

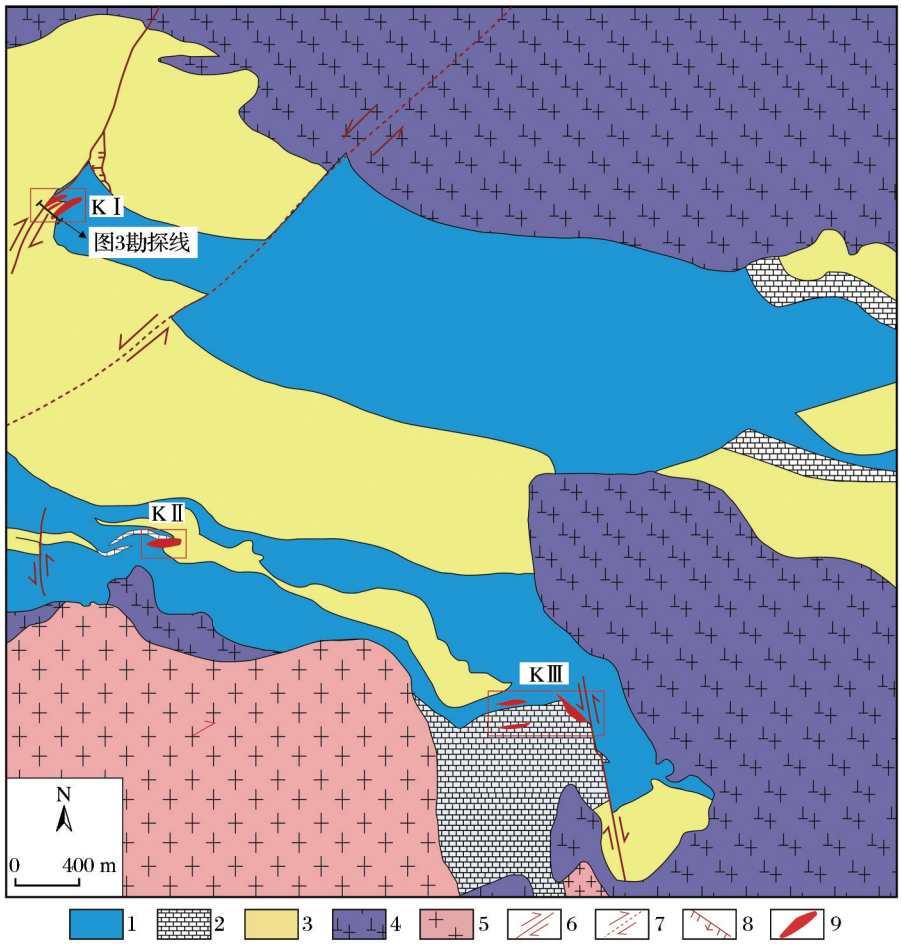
图1 西昆仑造山带及邻区构造格架图(修改自Leng et al,2019)

Fig. 1 Tectonic framework map of the western Kunlun orogenic belt and its adjacent areas(modified after Leng et al,2019)

大理岩与绿色绿泥石石英板岩之间的石榴石类矽卡岩中,大理岩与变流纹质凝灰岩之间,以及白色粗晶大理岩和灰白色变流纹质凝灰岩中。矿区断层主要有5条,走向大致为NE向,以平移断层为主,对矿体具有一定的破坏作用(汪玉会等,2013)。矿区内出露有中酸性岩浆岩,主要分布于矿区北部和南部,岩性以加里东期二长岩和花岗闪长岩为主,另出露有少量的钾长花岗岩。这些岩体出露宽度在数百米至数千米不等,与变质岩呈侵入接触关系,但在接触带未见矽卡岩(Zhang et al,2014)。

矿床以铅锌矿化为主,伴生有铜、钨、银、镉、铋和铁等多种金属矿化。矿区探明铅资源量10.5万t(平均品位为3.69%),锌资源量4 200 t(平均品位为1.30%),铜资源量2 000 t(平均品位为0.31%),银资源量25 t(平均品位为33×10^{-6}),WO_3资源量大于5 000 t(平均品位为0.2%)(Leng et al,2019)。矿区内矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、磁铁矿和磁黄铁矿,脉石矿物以石英、方解石和钙铝榴石为主。主要矿物共生组合为闪锌矿+黄铜矿+磁黄铁矿+方铅矿+黄铁矿+透辉石+石榴子石+石英±碳酸盐±白钨矿±毒砂±黝铜矿±绿帘石±绿泥石(汪玉会等,2013)。矿石常见有胶状、竹叶状、自形粒状、半自形—他形粒状和固溶体结构,矿石构造主要有块状、浸染状、团块状和脉状。围岩蚀变主要有矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化和硅化等。

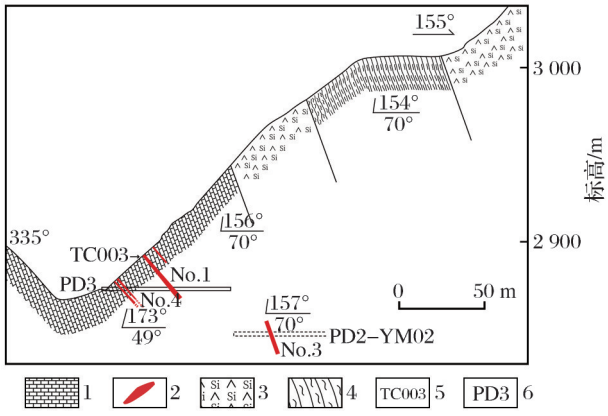
根据野外地质观察以及矿石手标本、镜下鉴定研究(图4和图5),结合矿石矿物的共生组合关系、矿石组构特征和矿物生成顺序,将库喀阿孜多金属



1.变碎屑岩;2.大理岩;3.变火山岩;4.加里东期二长岩;5.加里东期花岗闪长岩;6.平移断层;7.推测断层;8.正断层;9.矿体

图2 库喀阿孜铅锌多金属矿床地质简图(修改自Leng et al,2019)

Fig. 2 Simplified geological map of the Kukaazi Pb-Zn polymetallic deposit(modified after Leng et al,2019)



1.大理岩;2.矿体;3.硅质变质凝灰岩;4.绿泥石板岩;5.探槽;6.坑道

图3 库喀阿孜多金属矿床典型勘探线剖面图(修改自Leng et al,2019)

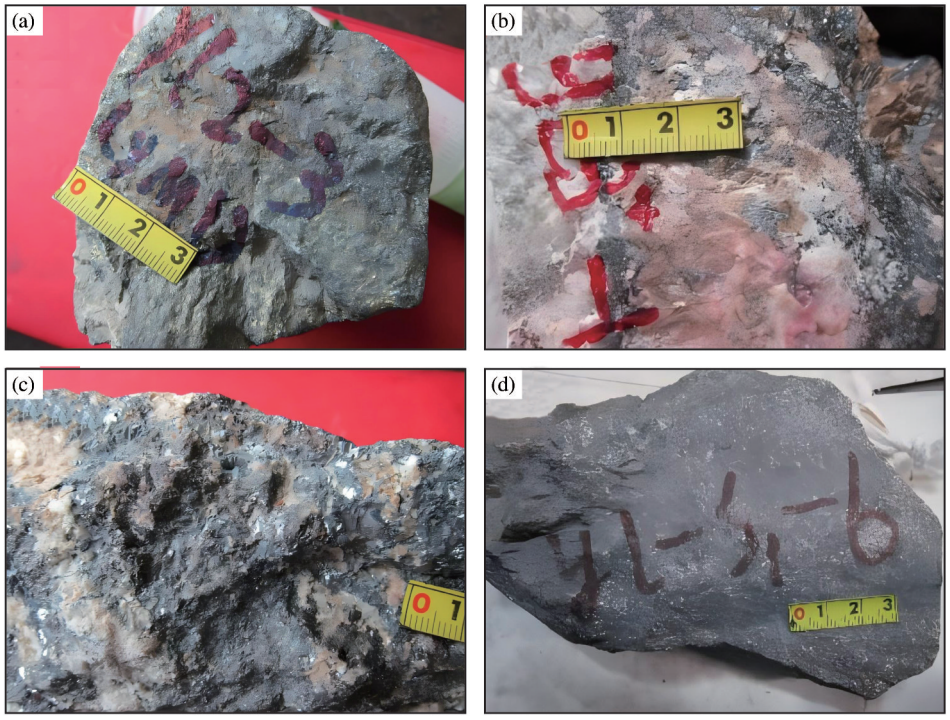
Fig. 3 Profile map of typical exploration line in the Kukaazi polymetallic deposit(modified after Leng et al,2019)

矿床的成矿过程划分为干矽卡岩、铜铁硫化物和铅锌硫化物阶段,其矿物生成顺序见图6。

干矽卡岩阶段为成矿的早期阶段,主要形成石榴子石和透辉石等硅酸盐矿物,硫化物含量极少;铜铁硫化物阶段主要形成磁黄铁矿、黄铁矿和黄铜矿等中—高温金属硫化物,矿石矿物赋存于矽卡岩岩体中,常以脉状、网脉状、团块状、角砾状或浸染状形式分布,脉石矿物主要为石英;铅锌硫化物阶段矿石矿物以方铅矿和闪锌矿为主,伴生黄铁矿。方铅矿与闪锌矿共生于大理岩中,脉石矿物主要为石英和方解石。

3 分析方法

对采自库喀阿孜矿区KⅠ和KⅡ矿段的34件



(a)矽卡岩中黄铜矿、磁黄铁矿和闪锌矿;(b)石榴子石矽卡岩被黄铜矿、方铅矿和闪锌矿穿插;(c)大理岩中的方铅矿、闪锌矿和方解石脉;(d)岩石中浸染状磁黄铁矿,含少量方铅矿和闪锌矿

图4 库喀阿孜铅锌多金属矿床中部分代表性矿石照片

Fig. 4 Photographs of partial representative ores in the Kukaazi Pb-Zn polymetallic deposit

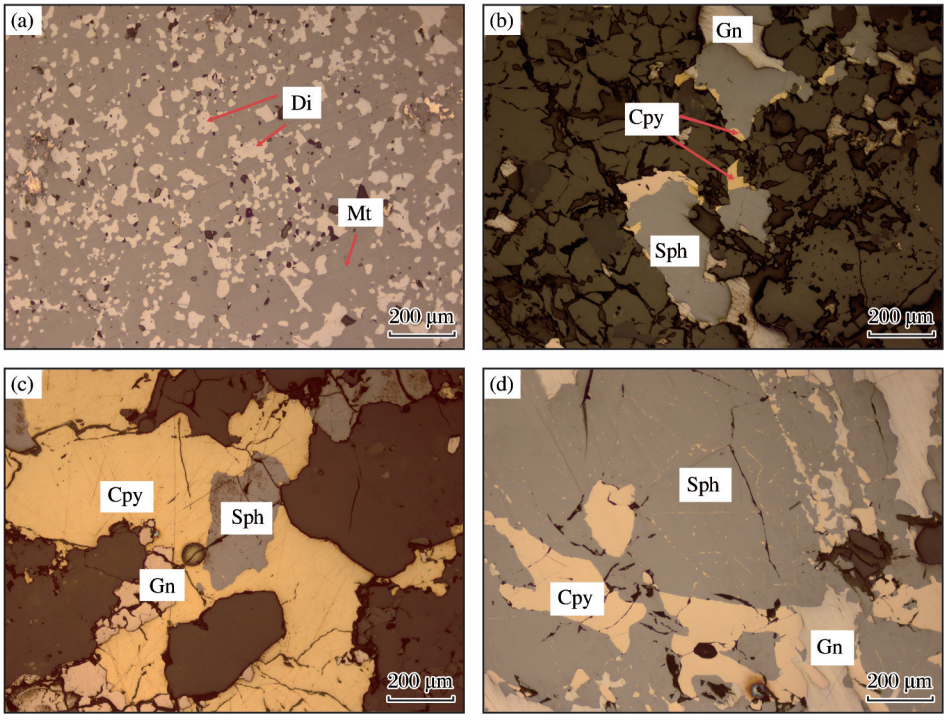
金属硫化物(磁黄铁矿、方铅矿、黄铜矿和闪锌矿)进行S同位素测试。磁黄铁矿和黄铜矿采自铜铁硫化物阶段,方铅矿和闪锌矿采自铅锌硫化物阶段。样品处理流程如下:将矿石样品破碎筛分至40~80目,在双目显微镜下分选出上述单矿物,并进一步研磨至200目以下。S同位素测试工作在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成,采用连续流同位素比值质谱仪(CF-IRMS,型号:Euro3000,GV instruments)进行分析。测试数据以国际S同位素CDT标准为基准,使用国家S同位素标准物质GBW-4414($\delta^{34}S$=-0.07‰)和GBW-4415($\delta^{34}S$=+22.15‰)进行校准,5次重复测量的误差控制在±0.2‰以内。

此外,本研究系统采集了34件金属硫化物、7件侵入岩和12件赋矿围岩样品,共计53件样品进行Pb同位素测试。Pb同位素测试工作在核工业北京地质研究所完成,所用仪器为Isoprobe-T热电离质谱仪。具体分析流程如下:(1)称取适量样品置于聚四氟乙烯坩埚中,依次加入氢氟酸(HF)和高氯酸($HClO_4$)进行消解,蒸干后加盐酸(HCl)复溶并再次蒸干,再用0.5 N HBr溶液溶解样品以备铅的分离;(2)将溶解液导入经预处理的强碱性阴离子交换树脂柱中,依次使用0.5 N HBr和2 N HCl淋洗,最后以6 N HCl洗脱铅组分,洗脱液蒸干后供质谱检测;(3)采用热表面电离质谱法测定Pb同位素组成,对于1 μg铅样品,$^{208}Pb/^{204}Pb$的测试精度优于0.005%。NBS981标准物质的测定结果(2σ)为:$^{208}Pb/^{206}Pb$=2.1681±0.0008,$^{207}Pb/^{206}Pb$=0.91464±0.00033,$^{204}Pb/^{206}Pb$=0.059042±0.000037。

4 测试分析结果

4.1 S同位素组成

S同位素分析结果(表1)显示,库喀阿孜多金属矿床不同矿段金属硫化物样品的$\delta^{34}S$值变化范围较大,为2.0‰~12.1‰(平均值为7.8‰)。按成矿阶段进行划分,铜铁硫化物阶段形成的磁黄铁矿和黄铜矿的$\delta^{34}S$值为2.0‰~6.9‰(平均值为5.5‰);



Mt-磁铁矿;Di-透辉石;Cpy-黄铜矿;Sph-闪锌矿;Gn-方铅矿;(a)细粒磁铁矿分散在干矽卡岩阶段形成的透辉石基质中;(b)铅锌硫化物阶段的方铅矿和闪锌矿共生,黄铜矿交代方铅矿闪锌矿;(c)黄铜矿包裹着方铅矿、闪锌矿;(d)铜铁硫化物阶段的黄铜矿被方铅矿、闪锌矿交代

图5　库喀阿孜铅锌多金属矿床中矿石样品的反射光显微照片

Fig. 5　Reflected light micrographs of the ore samples in the Kukaazi Pb-Zn polymetallic deposit

矿物	干矽卡岩阶段	铜铁硫化物阶段	铅锌硫化物阶段
石榴子石	———		
透辉石	———		
磁黄铁矿		———	
黄铜矿		———	
黄铁矿		———	
方铅矿			———
闪锌矿		———	———
石英		———	———
方解石			———

图6　库喀阿孜多金属矿床不同成矿阶段矿物生成顺序

Fig. 6　Sequence of mineral formation in different metallogenic stages of the Kukaazi polymetallic deposit

铅锌硫化物阶段形成的方铅矿和闪锌矿的$\delta^{34}S$值为7.4‰~12.1‰(平均值为10.3‰),所有样品的$\delta^{34}S$值分析误差均优于±0.2‰。

4.2　Pb同位素组成

Pb同位素分析结果(表2)显示,库喀阿孜矿区金属硫化物的Pb同位素组成较为稳定,变化范围较小,显示正常铅的特征,说明该矿床的铅来自较稳定的铅源。一般来说,金属硫化物中的U和Th含量微少,放射成因的铅较少,对Pb同位素组成的影响可以忽略不计。然而,赋矿围岩和侵入岩中含一定量的U和Th,二者衰变产生的放射成因会对Pb同位素组成造成影响,使全岩实测值产生偏差。

表1 库喀阿孜多金属矿床金属硫化物S同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic compositions of metal sulfides in the Kukaazi polymetallic deposit

样品编号	样品名称	岩性	成矿阶段	采样位置	$\delta^{34}S$/(±0.2‰)
yl-N3-7	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.1
yl-N3-36	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.4
yl-S1-1	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅡ矿段一号洞	3.7
yl-S1-2	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅡ矿段一号洞	4.3
yl-S1-6	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅡ矿段一号洞	3.9
yl-S6-3	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅡ矿段六号洞	2.0
yl-S6-7	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅡ矿段六号洞	3.8
yl-S4-8	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段四号洞	11.6
yl-S4-9	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段四号洞	8.7
yl-S4-20	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段四号洞	8.9
yl-S3-1	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	11.7
yl^{3+}-14	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.5
yl^{3+}-21	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.3
yl^{3+}-10	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.2
yl^{3+}-17	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	7.9
yl^{3+}-12	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.8
yl^{3+}-9	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	7.4
yl^{3+}-7	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.6
yl^{3+}-2a	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.7
yl-N3-7	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.5
yl-N3-11	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.0
yl-N3-32	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.6
yl-N3-16	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	5.9
yl^{3}-22a	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.9
yl^{3}-21	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.8
yl^{2}-8	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	KⅠ矿段二号洞	6.2
yl^{3}-1	闪锌矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	5.2
yl^{3}-21	闪锌矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	6.0
yl^{3}-2	闪锌矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	KⅠ矿段三号洞	5.6
yl^{3+}-2b	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	9.6
yl^{3+}-1b	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	10.3
yl^{3+}-21	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	12.0
yl-15	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	12.1
yl-9	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	KⅡ矿段三号洞	11.5

因此，本文对矿区赋矿围岩和侵入岩的Pb同位素进行了校正（表3），首先根据围岩的U、Th和Pb含量计算出样品的μ和ω值，然后利用铅演化模式消除成矿后围岩铅的时间效应。计算公式（张乾等，2000）如下：

$$(^{206}Pb/^{204}Pb)_t=(^{206}Pb/^{204}Pb)_{实测}-\mu(e^{\lambda t}-1) \quad (1)$$

$$(^{207}Pb/^{204}Pb)_t=(^{207}Pb/^{204}Pb)_{实测}-\mu/137.88(e^{\lambda t}-1) \quad (2)$$

$$(^{208}Pb/^{204}Pb)_t=(^{208}Pb/^{204}Pb)_{实测}-\omega(e^{\lambda t}-1) \quad (3)$$

式中：t为成矿年龄。

从测试结果（表3）来看，金属硫化物样品中，铜铁硫化物阶段形成的磁黄铁矿和黄铜矿的$^{206}Pb/^{204}Pb$、$^{207}Pb/^{204}Pb$和$^{208}Pb/^{204}Pb$比值分别为18.507~18.733、15.599~15.782和38.143~38.718，铅锌硫化物阶段形成的方铅矿和闪锌矿比值为18.394~18.654、

表2　库喀阿孜多金属矿床金属硫化物、侵入岩及赋矿围岩Pb同位素组成

Table 2　Lead isotopic composition of metal sulfides，intrusive rocks and ore-bearing wall rocks in the Kukaazi polymetallic deposit

样品编号	样品名称	岩性	成矿阶段	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	μ	ω	Th/U
yl-N3-7	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.530	15.622	38.219	9.49	35.20	3.59
yl-N3-36	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.612	15.719	38.529	9.68	36.90	3.69
yl-S1-1	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.597	15.719	38.504	9.68	36.88	3.69
yl-S1-2	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.649	15.782	38.718	9.80	38.06	3.76
yl-S1-6	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.596	15.719	38.516	9.68	36.94	3.69
yl-S6-3	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.559	15.599	38.143	9.45	34.54	3.54
yl-S6-7	磁黄铁矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.530	15.636	38.263	9.52	35.50	3.61
yl-S4-8	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.508	15.595	38.130	9.44	34.71	3.56
yl-S4-9	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.531	15.626	38.226	9.50	35.26	3.59
yl-S4-20	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.530	15.621	38.202	9.49	35.12	3.58
yl-S3-1	方铅矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.509	15.591	38.125	9.44	34.65	3.55
yl^{3+}-14	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.515	15.619	38.217	9.49	35.24	3.59
yl^{3+}-21	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.509	15.602	38.154	9.46	34.87	3.57
yl^{3+}-10	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.535	15.629	38.243	9.51	35.33	3.60
yl^{3+}-17	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.509	15.600	38.147	9.45	34.82	3.57
yl^{3+}-12	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.505	15.600	38.149	9.45	34.85	3.57
yl^{3+}-9	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.508	15.600	38.139	9.45	34.80	3.56
yl^{3+}-7	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.507	15.601	38.146	9.46	34.84	3.56
yl^{3+}-2a	方铅矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.503	15.597	38.144	9.45	34.81	3.56
yl-N3-7	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.522	15.612	38.246	9.48	35.26	3.6
yl-N3-11	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.525	15.605	38.200	9.46	35.00	3.58
yl-N3-32	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.604	15.610	38.244	9.46	34.81	3.56
yl-N3-16	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.733	15.626	38.305	9.48	34.55	3.53
yl^{3}-22a	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.564	15.643	38.390	9.53	35.90	3.65
yl^{3}-21	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.507	15.615	38.243	9.48	35.35	3.61
yl^{2}-8	黄铜矿	石榴子石矽卡岩	铜铁硫化物阶段	18.523	15.641	38.304	9.53	35.75	3.63
yl^{3}-1	闪锌矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.588	15.689	38.513	9.62	36.69	3.69
yl^{3}-21	闪锌矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.513	15.607	38.198	9.47	35.07	3.58
yl^{3}-2	闪锌矿	石榴子石矽卡岩	铅锌硫化物阶段	18.582	15.683	38.481	9.61	36.54	3.68
yl^{3+}-2b	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.394	15.680	38.340	9.62	36.95	3.72
yl^{3+}-1b	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.398	15.690	38.369	9.64	37.14	3.73
yl^{3+}-21	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.584	15.692	38.444	9.63	36.46	3.66
yl-15	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.573	15.680	38.397	9.60	36.22	3.65
yl-9	闪锌矿	大理岩	铅锌硫化物阶段	18.654	15.781	38.743	9.79	38.13	3.77
yl-YT-1	二长岩			18.230	15.617	37.836	9.54	35.70	3.62
yl-YT-2	二长岩			18.819	15.612	38.247	9.48	35.53	3.63
yl-156	二长岩			19.028	15.621	37.696	9.90	36.34	3.55
yl-158	二长岩			19.100	15.642	38.146	9.60	32.65	3.29
yl-159	花岗闪长岩			18.647	15.633	38.214	9.52	34.69	3.53
yl-165	花岗闪长岩			19.354	15.649	38.037	10.22	37.96	3.59
yl-168	花岗闪长岩			19.386	15.674	38.490	9.89	36.20	3.54
ylN302-7	大理岩			18.101	15.604	38.104	9.56	29.22	2.96
ylN302-5	大理岩			18.837	15.622	38.082	15.17	29.14	1.86
ylS302-1	大理岩			18.480	15.604	38.138	11.11	28.68	2.50
ylS302-3	大理岩			18.023	15.569	38.045	11.43	28.86	2.44
ylE102-2	灰色凝灰质大理岩			18.357	15.604	38.221	9.53	30.66	3.11
ylN302-1	黑灰色凝灰岩			18.586	15.600	38.204	9.46	35.12	3.59
ylN302-2	黑灰色凝灰岩			18.508	15.634	38.304	9.52	35.78	3.64
ylE102-1	黑云母石英板岩			18.363	15.601	37.752	9.48	35.64	3.64
ylE102-3	黑云母石英板岩			18.433	15.644	38.072	9.55	35.07	3.55
ylS602-1	黑云母石英板岩			18.900	15.631	37.481	9.64	30.93	3.11
ylN302-3	石榴子石矽卡岩			18.659	15.795	38.850	9.82	38.66	3.81
ylN3ys-1	石榴子石矽卡岩			18.506	15.611	38.294	9.48	34.80	3.55

15.591~15.781和38.125~18.743；在侵入岩样品中，二长岩比值为17.540~18.406、15.574~15.603和36.873~37.443；花岗闪长岩比值为17.959~18.671、15.595~15.634和37.178~37.671。赋矿围岩样品中，大理岩比值为17.197~17.740、15.523~15.565和37.392~37.489，灰色凝灰质大理岩比值为17.668、15.565和37.527，黑灰色凝灰岩比值为17.820~17.902、15.562~15.595和37.409~37.494，黑云母石英板岩比值为17.678~18.203、15.563~15.605和36.781~37.278，石榴子石矽卡岩比值为17.821~17.949、15.573~15.755和37.506~37.975。

表3 库喀阿孜多金属矿床校正后的赋矿围岩和侵入岩Pb同位素组成

Table 3 Pb isotopic compositions of ore-bearing wall rocks and intrusive rock after correction in the Kukaazi polymetallic deposit

样品编号	样品名称	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
yl-YT-1	二长岩	17.540	15.578	37.028	21.64	41.57
yl-YT-2	二长岩	18.134	15.574	37.443	20.68	56.38
yl-156	二长岩	18.312	15.581	36.873	23.63	76.31
yl-158	二长岩	18.406	15.603	37.407	23.58	49.28
yl-159	花岗闪长岩	17.959	15.594	37.429	20.87	33.07
yl-165	花岗闪长岩	18.615	15.608	37.178	25.50	88.51
yl-168	花岗闪长岩	18.671	15.634	37.671	25.73	75.75
ylN302-7	大理岩	17.410	15.565	37.443	24.05	19.36
ylN302-5	大理岩	17.740	15.561	37.422	44.69	23.14
ylS302-1	大理岩	17.677	15.559	37.489	29.17	19.79
ylS302-3	大理岩	17.197	15.523	37.392	29.79	21.08
ylE102-2	灰色凝灰质大理岩	17.668	15.565	37.527	22.49	26.22
ylN302-1	黑灰色凝灰岩	17.902	15.562	37.409	18.73	35.44
ylN302-2	黑灰色凝灰岩	17.820	15.595	37.494	19.76	24.86
ylE102-1	黑云母石英板岩	17.678	15.563	36.945	18.46	28.20
ylE102-3	黑云母石英板岩	17.743	15.605	37.278	21.05	22.69
ylS602-1	黑云母石英板岩	18.203	15.592	36.781	23.77	36.17
ylN302-3	石榴子石矽卡岩	17.949	15.755	37.975	29.61	33.17
ylN3ys-1	石榴子石矽卡岩	17.821	15.573	37.506	18.46	21.73

5 讨论

5.1 成矿物质来源

(1)硫的来源

S同位素可以用来判定硫化物的形成环境及硫的来源，对推断矿床成矿流体来源及成矿作用具有重要指示作用(Sakai,1968;Ohmoto,1986;Hoefs,1997;陈永清等，2009)。自然界中有3个主要的硫储库：一是幔源硫，其$\delta^{34}S$值为-3‰~3‰(Chaussidon et al,1990)；二是海水硫，其$\delta^{34}S$值随海水的地质时代不同在+10‰~+35‰范围内变化；三是沉积物中的还原硫，其$\delta^{34}S$值为大的负值，且变化范围较大(Rollinson,1993)。

当S同位素分馏达到平衡时，金属硫化物的$\delta^{34}S$值具有$\delta^{34}S_{磁黄铁矿}>\delta^{34}S_{闪锌矿}>\delta^{34}S_{黄铜矿}>\delta^{34}S_{方铅矿}$的变化趋势，库喀阿孜矿床金属硫化物的S同位素组成(表1，图3)明显不符合该顺序，说明该矿床的金属硫化物可能是不同矿化阶段的产物(郑永飞等，2000)。从S同位素直方图(图7)可以看出，该矿区金属硫化物的$\delta^{34}S$值呈多峰分布特征，显示3个峰值，分别为3‰~4‰、6‰~7‰和10‰~11‰。其中，峰值3‰~4‰(平均值为3.5‰)为铜铁硫化物阶段浸染状磁黄铁矿的S同位素值。当磁黄铁矿以稳定硫化物形式出现时，反映了低氧逸度的条件，成矿热液中的pH>6，且温度<500 ℃时，主要含硫物质是H_2S，在此时磁黄铁矿的$\delta^{34}S$值大致相当于含矿热液的$\delta^{34}S$值(郑永飞等，2000)。因此推断磁黄铁矿沉淀时含矿热液的$\delta^{34}S$值为3.5‰，该$\delta^{34}S$值略高于幔源硫的$\delta^{34}S$值而显著低于海水硫的$\delta^{34}S$值。峰值6‰~7‰代表铜铁硫化物阶段黄铜矿和磁黄铁矿的S同位素值，黄铜矿的$\delta^{34}S$值变化较小，组成较为稳定，且与磁黄铁矿的$\delta^{34}S$值相近，因此磁黄铁矿的$\delta^{34}S$平均值(6.2‰)可近似代表含矿热液的$\delta^{34}S$值(郑永飞等，2000)。由此推断，铜铁硫化物阶段的黄铜矿和磁黄铁矿形成于以岩浆流体为主、混入少量海水的热液环境(陈骏等，2004)。峰值10‰~11‰代表铅锌硫化物阶段方铅矿和闪锌矿的S同位素值，金属硫化物的$\delta^{34}S$值变化范围较大，为7.4‰~12.1‰，说明形成这些金属硫化物时成矿热液以岩浆流体为主，但混入了较多海水。

前人对库喀阿孜多金属矿床中与金属硫化物共生的热液方解石和石英进行O同位素研究，结果表明：当温度为380 ℃时，与石英达到O同位素平衡的流体$\delta^{18}O_{H_2O}$值为4.39‰~7.19‰，具有岩浆水与少量古海水混合的特征；当温度为240 ℃时，与热液方解石达到O同位素平衡的流体$\delta^{18}O_{H_2O}$值为

-1.54‰~2.85‰,与石英达到O同位素平衡的流体$\delta^{18}O_{H_2O}$值为-0.14‰~2.66‰,显示出岩浆水与海水或大气降水混合的特征(汪玉会等,2013)。如前文所述,库喀阿孜多金属矿床金属硫化物的$\delta^{34}S$值呈多峰分布特征,反映不同成矿阶段硫来源的差异性,从早到晚,成矿热液中海水混入比例逐渐增加:早期铜铁硫化物阶段以岩浆硫为主,混有少量海水;晚期铅锌硫化物阶段则混入较多海水,$\delta^{34}S$值显著升高。该演化特征表明,矿区内成矿流体经历了由岩浆热液向海水混合热液的转变,暗示金属硫化物与海底火山作用有关的热水沉积作用具有成因联系。

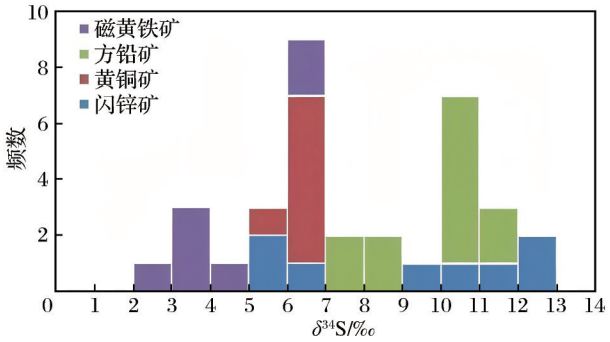


图7　库喀阿孜多金属矿床不同金属硫化物的S同位素直方图

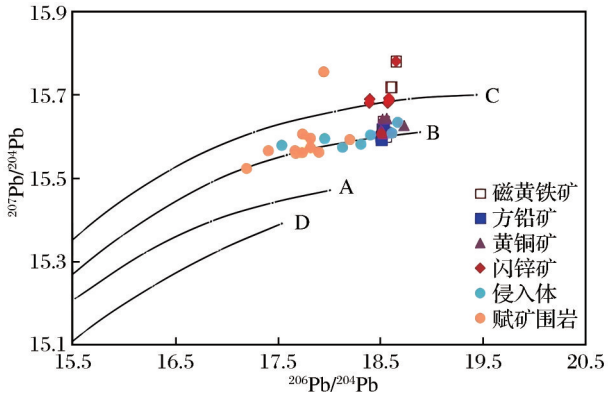
Fig. 7　Histogram of sulfur isotopes of different metal sulfides in the Kukaazi polymetallic deposit

(2)铅的来源

由于Pb同位素在物质迁移和矿质沉淀中几乎不发生分馏作用,导致Pb同位素变化的主要因素是放射性元素U和Th的衰变。岩浆演化和分异作用、热液、变质作用和风化过程均有可能改变U/Pb和Th/Pb比值,因此通过分析岩石和矿物中的Pb同位素组成可以研究成矿物质来源和矿床成因(Macfarlane et al,1990;Chiaradia et al,2004)。

Pb同位素中μ值、ω值和Th/U比值的变化反映了矿床所经历的地质过程信息,可以用来推断矿床中铅的来源。前人研究认为,高μ值(大于9.58)的铅通常来自U和Th相对富集的上部地壳(Zartman et al,1981;吴开兴等,2002),μ值较低和ω值较高的铅通常来自上地幔(Kamona et al,1999),而μ值较低和ω值较低的铅指示下地壳来源(Doe et al,1979;吴开兴等,2002)。库喀阿孜多金属矿床中金属硫化物的μ值为9.44~9.80(平均值为9.54),小于上地壳铅的μ值(9.58),但明显大于原始地幔铅的μ值(8.92);ω值为34.54~38.13(平均值为35.68),略低于地壳铅的平均值(ω=36.84),而高于地幔铅的ω值(31.84)(Doe et al,1979);Th/U比值为3.53~3.77,平均值为3.62,略高于地幔的Th/U比值(3.45),而低于地壳的Th/U比值(4)。综合上述特征,推测库喀阿孜多金属矿床矿石铅为壳幔混合来源,且以地壳来源为主。

为进一步探讨Pb的来源,将样品的Pb同位素组成投影至$^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$构造演化模式图(图8)上,结果显示,磁黄铁矿的Pb同位素组成分布在造山带演化线与上地壳演化线之间且变化较大,方铅矿、赋矿围岩和侵入岩的Pb同位素组成则集中分布在造山带与上地壳之间,更靠近造山带演化线的一侧,而闪锌矿的Pb同位素组成则集中分布在上地壳演化线上。



A-地幔;B-造山带;C-上地壳;D-下地壳

图8　库喀阿孜多金属矿床不同金属硫化物、侵入岩和赋矿围岩$^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$模式图

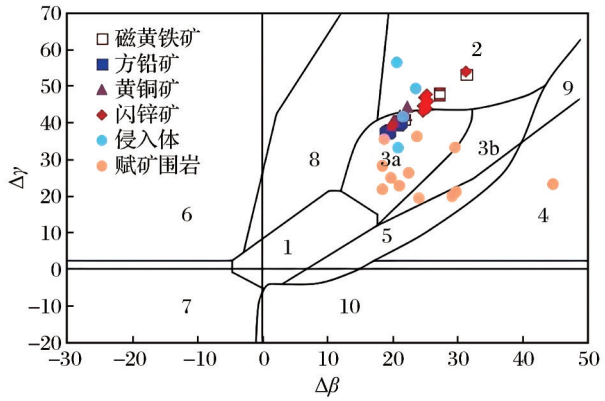
(底图据Zartman et al,1981)

Fig. 8　Pattern diagram of $^{207}Pb/^{204}Pb$-$^{206}Pb/^{204}Pb$ of different metal sulfides, intrusive rocks, and ore-bearing wall rocks in the Kukaazi polymetallic deposit

(base map according to Zartman et al, 1981)

Pb同位素$\Delta\gamma$-$\Delta\beta$构造源区判别图(图9)显示,磁黄铁矿和闪锌矿的Pb同位素组成落在上地壳和岩浆作用上地壳与地幔混合俯冲带的过渡范围,主要集中在上地壳范围;而方铅矿和黄铜矿的Pb同位素组成则落于岩浆作用上地壳与地幔混合俯冲带的过渡范围,赋矿围岩中的Pb同位素组成落在

上地壳与地幔混合的俯冲带范围，主要分布在上地壳范围；侵入岩的Pb同位素组成落在上地壳和上地壳与地幔混合的岩浆作用俯冲带的过渡范围。



1.地幔源铅；2.上地壳铅；3.上地壳与地幔混合的俯冲带铅（3a–岩浆作用；3b–沉积作用）；4.化学沉积型铅；5.海底热水作用铅；6.中深变质作用铅；7.深变质下地壳铅；8.造山带铅；9.古老页岩上地壳铅；10.退变质铅

图9 库喀阿孜多金属矿床不同金属硫化物、侵入岩和赋矿围岩Δγ–Δβ构造源区判别图（底图据朱炳泉等，1998）

Fig. 9 Diagram of Δγ–Δβ for discriminating tectonic setting of lead sources of different metal sulfides, intrusions, and ore-bearing wall rocks in the Kukuaazi polymetallic deposit (base map according to Zhu et al, 1998)

综上所述，库喀阿孜矿区内金属硫化物的Pb同位素组成变化范围较小，具有普通铅特征，结合其金属硫化物的μ值、ω值和Th/U值特征，推测矿区内金属硫化物的铅为地壳与地幔混合来源，且以地壳来源为主，混入了少量地幔来源的铅。长英质侵入体与变火山岩围岩样品的Pb同位素组成差异较大，而金属硫化物与长英质侵入体的Pb同位素组成较为接近，在Pb同位素投图中具有重合的部分，据此推测，库喀阿孜多金属矿床的Pb、Zn、Cu和Fe等成矿物质可能主要由与长英质侵入岩浆有关的岩浆热液和深部变质结晶基底共同提供。

5.2 矿床成因

库喀阿孜多金属矿床的含矿岩系为一套浅变质岩系，由大理岩、石榴子石矽卡岩和绿色透辉石岩等组成，大理岩（或粗晶大理岩）中主要矿物为方解石，或含少量的石英和蒙脱石等矿物，具有细晶、中—粗粒结构，纹层状和块状构造；石榴子石矽卡岩中主要矿物为方解石、石英和钙铝榴石，其次含有少量蒙脱石和伊利石等矿物，岩石具斑块状构造，其中的石英颗粒非常细，石榴石常呈1~3 mm大小的斑点状集合体或浸染状分布；绿色透辉石岩中主要矿物为辉石，此外含有少量的石英、蒙脱石、角闪石和高岭石矿物（汪玉会等，2013）。从矿体产出特征来看，库喀阿孜多金属矿床的矿体多呈透镜状或似层状；地表矿化蚀变在横向上分带不明显，在垂向上则表现出一定规律：地表硅化较强，向深部逐渐减弱，绿泥石化则相应增强。矿物组成主要为黄铁矿、方铅矿、黄铜矿和闪锌矿；矿石构造以脉状、网脉状、团块状、角砾状和浸染状为主。Leng et al（2018）对辉钼矿和白钨矿的稀土元素分析结果进一步证实，该矿床形成于大陆弧环境下的矽卡岩成矿系统。矿区和外围花岗岩体的锆石U–Pb年龄为461~452 Ma（汪玉会等，2013；陶再礼等，2022），属于加里东期，表明矿床的形成可能与加里东期原特提斯洋的闭合有关。

本次研究Pb同位素组成表明，库喀阿孜矿区与长英质侵入体有关的岩浆热液与深部变质结晶基底共同为金属硫化物的形成提供了物质来源，源自深部地幔的岩浆与地壳物质混合后形成的岩浆，是该矿床早期的流体来源，导致了Pb、Zn、Cu和Fe的矿化。库喀阿孜多金属矿床S同位素组成表明，最早形成磁黄铁矿的含矿热液为混入极少量海水的岩浆流体，不同金属硫化物形成时，由于成矿时间和成矿温度不同，越晚形成的金属硫化物，其含矿热液中混入的海水相对越多。

前人对该矿床金属矿物的微量元素分析结果表明，闪锌矿微量元素特征显示该矿床属于矽卡岩型（Leng et al，2019）。矿区内围岩蚀变十分发育，主要包括矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、碳酸盐化和硅化（梁东等，2022）。大兴安岭南段白音诺尔铅锌矿床是我国典型的矽卡岩型铅锌矿床，其成矿岩体主要为花岗闪长岩和闪长玢岩，部分矿体产于正长斑岩与大理岩接触带，矿石以方铅矿和闪锌矿为主，蚀变类型包括绿帘石化和矽卡岩化等，构造环境为大陆弧环境，矿化分带明显。对比分析表明，库喀阿孜多金属矿床的特征与大兴安岭白音诺尔铅锌矿床及其他典型矽卡岩型矿床具有相似性（Meinert et al，2005；王瑞良，2023）。

综上所述，推测库喀阿孜多金属矿床为远端矽

卡岩型铜铅锌多金属矿床,其成矿物质为壳幔混合来源,矿床形成与海底火山活动和加里东期原特提斯洋闭合有关。

6 结论

(1)矿区内金属硫化物S同位素组成均为正值,成矿早期形成的磁黄铁矿可能由于混入海水较少,其硫更接近幔源硫;而成矿晚期形成的硫化物因混入的海水变多,S同位素值相应升高,更接近海水硫。

(2)矿区内的Pb同位素组成分析结果表明,库喀阿孜多金属矿床成矿物质以壳幔混合来源为主,且主要来自壳源物质,可能主要由与长英质侵入岩有关的岩浆热液和深部变质结晶基底共同提供。

(3)综合矿区内出露的岩(矿)石组构特征和S-Pb同位素特征,认为新疆库喀阿孜多金属矿床属于与海底火山活动相关的远端矽卡岩型铜铅锌多金属矿床。

参考文献(References):

Bao Z A, Yuan H L, Zong C L, et al, 2016. Simultaneous determination of trace elements and lead isotopes in fused silicate rock powders using a boron nitride vessel and fsLA-(MC)-ICP-MS [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 31(4): 1012-1022.

Chen F C, Deng J, Shu Q H, et al, 2017. Geology, fluid inclusion and stable isotopes (O, S) of the Hetaoping distal skarn Zn-Pb deposit, northern Baoshan block, SW China[J]. Ore Geology Reviews, 90: 913-927.

Chaussidon M, Lorand J P, 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (North-Eastern Pyrenees, France): an ion microprobe study [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54(10): 2835-2846.

Chiaradia M, Fontboté L, Paladines A, 2004. Metal sources in mineral deposits and crustal rocks of Ecuador (1° N-4° S): a lead isotope synthesis [J]. Economic Geology, 99(6): 1085-1106.

Darling J R, Storey C D, Hawkesworth C J, et al, 2012. In-situ Pb isotope analysis of Fe-Ni-Cu sulphides by laser ablation multi-collector ICPMS: new insights into ore formation in the Sudbury impact melt sheet [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 99: 1-17.

Doe B R, Zartman R E, 1979. Plumbotectonics: the phanerozoic [M]//Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York: John Wiley & Sons.

Hoefs J, 1997. Stable isotope geochemistry [M]. 4th ed. Berlin: Springer.

Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al, 2002. Petrology and geochemistry of shoshonitic plutons from the western Kunlun orogenic belt, Xinjiang, northwestern China: implications for granitoid geneses[J]. Lithos, 63(3/4): 165-187.

Kamona A F, Lévêque J, Friedrich G, et al, 1999. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran-Lufilian Fold Belt of Central Africa [J]. Mineralium Deposita, 34(3): 273-283.

Leng C B, Wang Y H, Zhang X C, et al, 2018. 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, 37(1): 47-59.

Leng C B, Wang W, Ye L, et al, 2019. 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, 184: 103995.

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

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

Macfarlane A W, Marcet P, LeHuray A P, et al, 1990. Lead isotope provinces of the Central Andes inferred from ores and crustal rocks [J]. Economic Geology, 85(8): 1857-1880.

Meinert L D, Dipple G M, Nicolescu S, 2005. World skarn deposits [M]//One Hundredth Anniversary Volume. Littleton: Society of Economic Geologists.

Ohmoto H, 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 6(1): 491-559.

Pettke T, Oberli F, Audétat A, et al, 2012. Recent developments in element concentration and isotope ratio analysis of individual fluid inclusions by laser ablation single and multiple collector ICP-MS [J]. Ore Geology Reviews, 44: 10-38.

Rollinson H R, 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation [M]. Harlow, Essex, England: Longman Scientific & Technical.

Sakai H, 1968. Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes[J]. Geochemical Journal, 2(1): 29-49.

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

Xiao W J, Windley B F, Liu D Y, et al, 2005. 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, 113(6): 687-705.

Yuan H L, Yuan W T, Cheng C, et al, 2016. Evaluation of lead isotope compositions of NIST NBS 981 measured by thermal ionization mass spectrometer and multiple-collector inductively coupled plasma mass spectrometer [J]. Solid Earth Sciences, 1(2): 74-78.

Zhang Z W, Shen N P, Peng J T, et al, 2014. Syndeposition and epigenetic modification of the strata-bound Pb-Zn-Cu deposits associated with carbonate rocks in western Kunlun, Xinjiang, China[J]. Ore Geology Reviews, 62: 227-244.

Zafar T, Leng C B, Zhang X C, et al, 2019. Geochemical attributes of magmatic apatite in the Kukaazi granite from western Kunlun orogenic belt, NW China: implications for granite petrogenesis and Pb-Zn (-Cu-W) mineralization [J]. Journal of Geochemical Exploration, 204: 256-269.

Zhang Y, Niu Y L, Hu Y, et al, 2016. 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, 245: 191-204.

Zhang C L, Lu S N, Yu H F, et al, 2007. 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, 50(6): 825-835.

Zhang X C, Wang Y H, Leng C B, et al, 2014. 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), 88 (Suppl.2): 244-246.

Zartman R E, Doe B R, 1981. Plumbotectonics: the model[J]. Tectonophysics, 75(1/2): 135-162.

陈永清, 黄静宁, 卢映祥, 等, 2009. 中缅毗邻区金腊 Pb-Zn-Ag多金属矿田元素、稳定同位素和流体包裹体地球化学[J]. 地球科学, 34(4): 585-594. Chen Yongqing, Huang Jingning, Lu Yingxiang, et al, 2009. Geochemistry of elements, sulphur-lead isotopes and fluid inclusions from Jinla Pb-Zn-Ag poly-metallic ore field at the joint area across China and Myanmar border [J]. Earth Science, 34 (4): 585-594.

陈骏, 王鹤年, 2004. 地球化学[M]. 北京: 科学出版社. Chen Jun, Wang Henian, 2004. Geochemistry [M]. Beijing: Science Press.

董连慧, 徐兴旺, 范廷宾, 等, 2015. 喀喇昆仑火烧云超大型喷流—沉积成因碳酸盐型 Pb-Zn 矿的发现及区域成矿学意义[J]. 新疆地质, 33(1): 41-50. Dong Lianhui, Xu Xingwang, Fan Tingbin, et al, 2015. Discovery of the Huoshaoyun super-large exhalative-sedimentary carbonate Pb-Zn deposit in the western Kunlun area and its great significance for regional metallogeny[J]. Xinjiang Geology, 33(1): 41-50.

丁道桂, 王道轩, 刘伟新, 1996. 西昆仑造山带与盆地[M]. 北京: 地质出版社. Ding Daogui, Wang Daoxuan, Liu Xinwei, 1996. The western Kunlun orogenic belt and basin [M]. Beijing: Geological Publishing House.

贾文彬, 李永胜, 严光生, 等, 2018. 青海沱沱河地区多才玛铅锌矿床成因: 原位 S 和 Pb 同位素证据[J]. 岩石学报, 34(5): 1285-1298. Jia Wenbin, Li Yongsheng, Yan Guangsheng, et al, 2018. Ore genesis of the Duocaima Pb-Zn deposit, Tuotuohe area, Qinghai Province, China: evidences from in situ S and Pb isotopes[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(5): 1285-1298.

刘建平, 王核, 李社宏, 等, 2010. 西昆仑北带喀依孜斑岩型钼矿床地质地球化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报, 26(10): 3095-3105. Liu Jianping, Wang He, Li Shehong, et al, 2010. Geological and geochemical features and geochronology of the Kayizi porphyry molybdenum deposit in the northern belt of western Kunlun, NW China [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 3095-3105.

梁东, 万生楠, 张志新, 等, 2022. 西昆仑库卡阿孜铅锌矿地质特征与矿床成因浅析[J]. 新疆有色金属, 45(2): 66-68. Liang Dong, Wan Shengnan, Zhang Zhixin, et al, 2022. Geological characteristics and deposit genesis analysis of the Kukaazi lead-zinc mine in West Kunlun [J]. Xinjiang Youse Jinshu, 45(2): 66-68.

孙海田, 李纯杰, 吴海, 等, 2003. 西昆仑金属成矿省概论[M]. 北京: 地质出版社. Sun Haitian, Li Chunjie, Wu Hai, 2003. Introduction to metallogenic province of west Kunlun[M]. Beijing: Geological Publishing House.

陶再礼, 尹继元, 袁超, 等, 2022. 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,38(11):3321-3340.Tao Zaili, Yin Jiyuan, Yuan Chao, et al, 2022. 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, 38(11): 3321-3340.

王核,李沛,马华东,等,2017.新疆和田县白龙山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义[J].大地构造与成矿学,41(6):1053-1062.Wang He, Li Pei, Ma Huadong, et al, 2017. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication[J]. Geotectonica et Metallogenia, 41(6): 1053-1062.

吴开兴,胡瑞忠,毕献武,等,2002.矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J].地质地球化学,30(3):73-81.Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al, 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: a review[J]. Geology-geochemistry, 30(3): 73-81.

汪玉会,冷成彪,张兴春,2013.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,32(6):736-745.Wang Yuhui, Leng Chengbiao, Zhang Xingchun, 2013. 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, 32(6): 736-745.

王瑞良,2023.大兴安岭南段白音诺尔铅锌矿床成矿机制[D].北京:中国地质大学(北京).Wang Ruiliang, 2023. Metallogenic mechanism of the Baiyinnuoer Pb-Zn deposit in the Southern Great Xing'an Range[D]. Beijing: China University of Geosciences.

许志琴,李思田,张建新,等,2011.塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J].岩石学报,27(1):1-22.Xu Zhiqin, Li Sitian, Zhang Jianxin, et al, 2011. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(1): 1-22.

郑永飞,徐宝龙,周根陶,2000.矿物稳定同位素地球化学研究[J].地学前缘,7(2):299-320.Zheng Yongfei, Xu Baolong, Zhou Gentao, 2000. Geochemical studies of stable isotopes in minerals[J]. Earth Science Frontiers, 7(2): 299-320.

朱炳泉,李献华,戴橦谟,等,1998.地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M].北京:科学出版社.Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Tongmo, et al, 1998. Theory and application of isotope system in earth science: discussion on the evolution of the crust and mantle of China[M]. Beijing: Science Press.

张乾,潘家永,邵树勋,2000.中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J].地球化学,29(3):231-238.Zhang Qian, Pan Jiayong, Shao Shuxun, 2000. An interpretation of ore lead sources from lead isotopic compositions of some ore deposits in China[J]. Geochimica, 29(3): 231-238.

Source of Ore-forming Materials and Genesis of the Kukaazi Polymetallic Deposit in Xinjiang: Evidence from S-Pb Isotopes

QI Hanji[1], ZHANG Xingchun[2], WANG Yuhui[2,3], LENG Chengbiao[1]

1. *School of Earth and Planetary Sciences, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *Jiangxi, China*;
2. *State Key Laboratory of Critical Mineral Research and Exploration, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang* 550081, *Guizhou, China*;
3. *Guizhou Central Laboratory of Geology and Mineral Resources, Guiyang* 550018, *Guizhou, China*

Abstract: The Western Kunlun Orogenic Belt, situated along the northern margin of the Tibetan Plateau, represents one of China's significant polymetallic metallogenic belts. The Kukaazi deposit, located in Yecheng County, Xinjiang, is a newly identified Pb-Zn-(Cu-W) polymetallic deposit within this belt, exhibiting considerable mineralization potential. However, due to its remote location and the paucity of fundamental geological research, the sources of ore-forming materials and the genetic classification of this deposit remain ambiguous, thereby limiting the comprehension of regional metallogenic patterns and hindering further exploration efforts. The deposit comprises three ore blocks: KⅠ, KⅡ, and KⅢ, with ore bodies manifesting as

lenticular and stratoid forms within the marble, metasiliciclastic rocks, and contact zones of the Mesoproterozoic Changcheng System. Based on mineral paragenetic associations and cross-cutting relationships, the mineralization process is delineated into the dry skarn stage, the copper-iron sulfide stage, and the lead-zinc sulfide stage. This study undertook a comprehensive sulfur isotope analysis of metal sulfides from the KI and KII ore blocks, alongside a lead isotope analysis of metal sulfides, host rocks, and intrusive rocks, based on an in-depth characterization of the deposit's geological features and mineralization stages. The objective was to trace the sources of ore-forming materials and elucidate the genesis of the deposit. The sulfur isotope analysis revealed that the $\delta^{34}S$ values of metal sulfides range from 2.0‰ to 12.1‰, with a mean of 7.8‰, displaying a multimodal distribution. Notably, pyrrhotite from the copper-iron sulfide stage exhibited relatively low $\delta^{34}S$ values(mean 3.5‰), akin to mantle-derived sulfur, whereas galena and sphalerite from the lead-zinc sulfide stage showed higher $\delta^{34}S$ values (mean 10.3‰). This suggests that the early ore-forming fluid was predominantly magmatic hydrothermal in origin, with an increasing contribution from seawater over time. The lead isotope analysis indicated that the lead isotope compositions of metal sulfides were relatively homogeneous, with $^{206}Pb/^{204}Pb$, $^{207}Pb/^{204}Pb$, and $^{208}Pb/^{204}Pb$ values ranging from 18.394 to 18.733, 15.591 to 15.782, and 38.125 to 38.743, respectively. The observed values exhibit similarity to those found in intrusive rocks, yet they differ significantly from those of the host rocks. This suggests that the ore-forming materials were derived from a combination of magmatic hydrothermal fluids associated with felsic intrusive magmas and the deep metamorphic crystalline basement. The μ values of metal sulfides range from 9.44 to 9.80(mean 9.54), ω values from 34.54 to 38.13(mean 35.68), and Th/U ratios from 3.53 to 3.77(mean 3.62), indicating a crust-mantle mixed origin with a predominance of crustal components. Through a comprehensive analysis of the deposit's geological characteristics and sulfur-lead isotope data, this study concludes that the Kukaazi deposit represents a distal skarn-type Cu-Pb-Zn polymetallic deposit associated with submarine volcanic activity. This research contributes novel geochemical data pertinent to the genesis of polymetallic deposits in the Western Kunlun Orogenic Belt and provides critical insights for regional mineral exploration efforts.

Key words: S-Pb isotopes; source of ore-forming material; ore genesis; Kukaazi polymetallic deposit; Western Kunlun Orogen