



新疆铁克里克铜铅锌多金属矿床 多因复成成矿作用

张辰光¹, 赖健清¹, 曹勇华^{1,2}, 刘印明¹, 杨金明³, 韩永生^{1,3}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. Department of Earth Sciences, University of Western Ontario, London, Ontario N6A5B7, Canada;

3. 有色金属矿产地质调查中心 新疆地质调查所, 乌鲁木齐 830000)

摘 要: 铁克里克铜铅锌多金属矿床位于中亚壳体塔里木地洼区, 历经多期大地构造成矿阶段, 是西昆仑地区库斯拉普成矿带上重要的铜铅锌矿床。在分析该矿床成矿地质条件的基础上, 研究矿区流体包裹体以及硫、铅同位素组成特征, 探讨成矿流体特征及成矿物质来源。矿区矿石硫样品 $\delta^{34}(\text{S}_{\text{CDT}})$ 值分布较宽($+8.2 \times 10^{-3} \sim -7.6 \times 10^{-3}$), 包裹体均一温度介于 $103 \sim 284\text{ }^{\circ}\text{C}$, 盐度介于 $0.18\% \sim 24.47\%(\text{NaCl})$, 表明流体来源不是单一的, 存在至少两种流体的混合。对各类型矿石铅同位素示踪研究表明: 研究区矿石铅主要为壳幔混合的俯冲铅, 主要成矿物质来源于赋矿围岩和下伏基底。研究认为, 铁克里克矿床表现出多大地构造成矿阶段、多物质来源、多成矿作用等特点, 为较典型的同生沉积-后期热液改造型多因复成矿床。

关键词: 流体包裹体; 硫铅同位素; 多因复成矿床; 铁克里克

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

库斯拉普成矿带位于西昆仑-帕米尔地区东北缘和塔里木盆地西南缘交界部位, 铁克里克铜铅锌多金属矿床作为该成矿带已发现的重要矿床^[1], 受到广泛关注, 前人对其矿床成因多有争议, 提出矿床成因因为密西西比河谷型^[2-3]、中低温热液脉型^[4]、海相热水沉积型等^[5], 不同的观点反映了成矿作用的复杂性和矿床成因的多面性。本文作者在地洼学说及多因复成成矿理论^[6]的指导下, 通过对该矿床的流体包裹体和同位素研究, 揭示成矿流体特征, 成矿物质来源, 探讨矿床成矿机制。

1 地质背景

铁克里克矿床大地构造位置属塔里木地洼区。塔里木地洼区在太古宙为前地槽阶段, 元古宙进入地槽阶段, 产生了一套具有复理石特征的陆屑砂泥质建造。震旦纪中期以后, 该区地壳活动的强度逐渐减弱, 进入地台阶段。由震旦纪贝义西组至二叠系构成地台构造层, 自下而上分别为冰碛建造(Z_2)、碳酸盐建造

(ϵ -O)、砂泥质建造(S-D)、含煤建造(C-P)。三叠纪区内未见沉积, 可能处于剥蚀状态。印支运动使本区进入地洼初动期, 强烈的挤压活动与大幅度差异升降运动, 使研究区固结较深的地槽构造层组成的褶皱基底及地台构造盖层遭受大规模逆冲断裂(如主帕米尔-铁克里克断裂等)和推覆构造^[7], 目前研究区尚处于地洼激烈期^[8]。

矿区出露地层主要为中泥盆统克孜勒陶下亚组(D_2kz^a)含砾石英砂岩和上亚组(D_2kz^b)石英砂岩、粉砂岩和灰岩及下侏罗统莎里塔什组(J_1s)砾岩夹少量砂岩(见图1)。本区中泥盆世始终处于滨海-浅海相环境, 早期以浅海相为主, 形成一套含砾石英砂岩(D_2kz^a)。其后海水上升, 物源丰富, 形成一套中厚层状中粗粒石英砂岩(D_2kz^{b-1})。此后, 海水继续上升, 物质来源相对稳定, 沉积物以粉砂岩为主, 沉积形成 D_2kz^{b-2} 地层。海水继续上升, 且水温温暖, 沉积形成一套富含珊瑚、腕足类生物化石的碳酸盐地层(D_2kz^{b-3})。而后海水下降, 又沉积形成了一套与 D_2kz^{b-2} 岩性差别不大的地层(D_2kz^{b-4})。这一时期相对持续时间较长, 沉积环境稳定。矿区南部出露的 J_1s 地层以低角度不整合的推覆构造

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAB06B05-04); 中南大学“创新驱动项目”(2015CX008)

收稿日期: 2015-09-28; **修订日期:** 2016-02-25

通信作者: 赖健清, 博士, 教授; 电话: 13875983805; E-mail: lj@csu.edu.cn

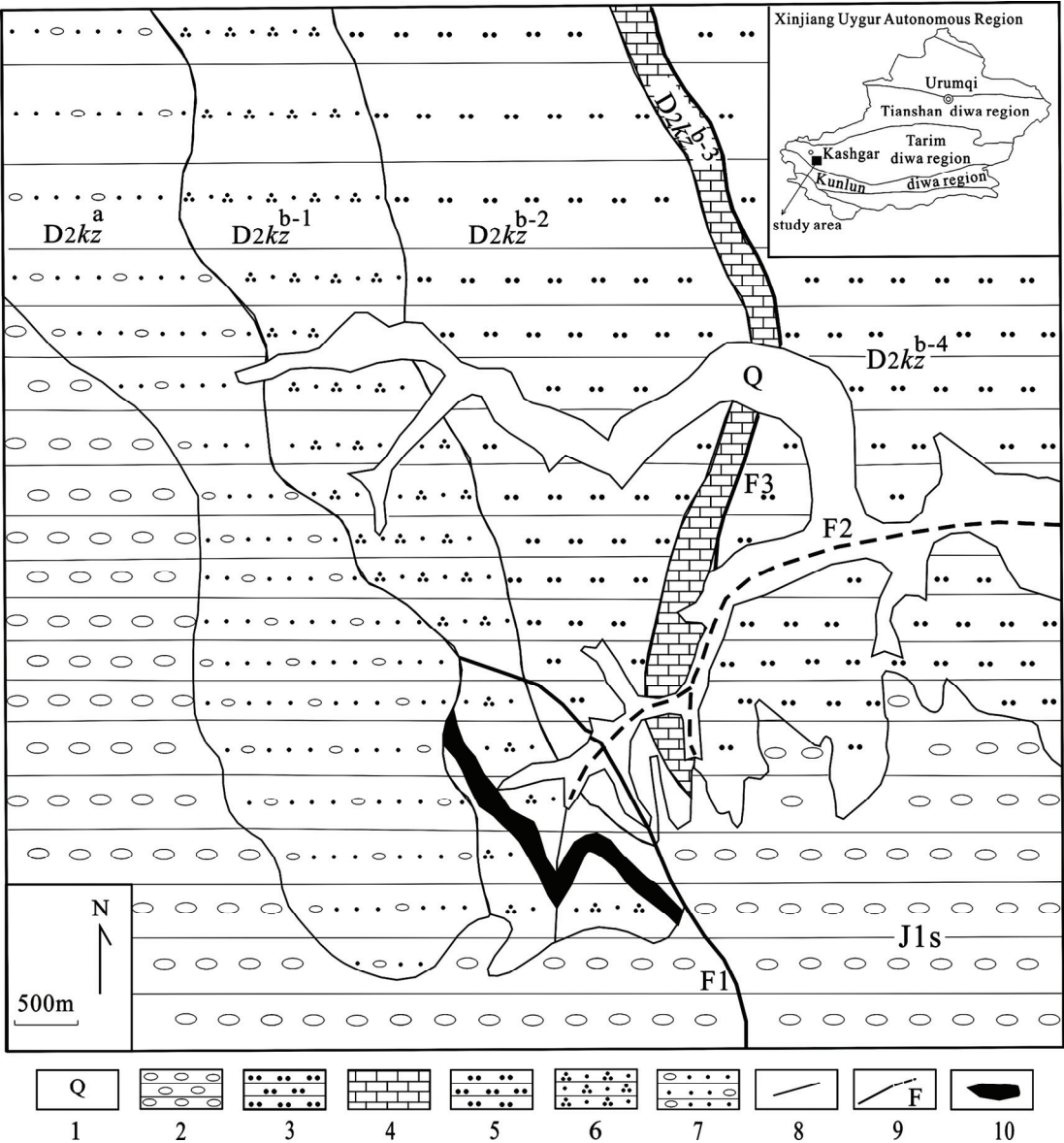


图1 铁克里克矿床地质简图(据文献[10]修改,大地构造图据文献[6]修改):1—第四系;2—中泥盆统克孜勒陶上亚组第四岩性段粉砂岩;3—中泥盆统克孜勒陶上亚组第三岩性段灰岩;4—中泥盆统克孜勒陶上亚组第二岩性段粉砂岩;5—中泥盆统克孜勒陶上亚组第一岩性段石英砂岩;6—中泥盆统克孜勒陶下亚组含砾石英砂岩;7—中泥盆统克孜勒陶下亚组含砾石英砂岩;8—地层界线;9—实测及推测断层;10—矿体

Fig. 1 Geological sketch map of Tiekelike deposit (Modified from Ref. [10]; Tectonic map according to Ref.[6]): 1—Quaternary; 2—Conglomerate of Lower Jurassic Lower Shalitashen Group; 3—Siltstone of fourth lithologic formation of Middle Devonian Upper Keziletai Group; 4—Limestone of third lithologic formation of Middle Devonian Upper Keziletai Group; 5—Siltstone of second lithologic formation of the Middle Devonian Upper Keziletai Group; 6—Quartz sandstone of first lithologic formation of Middle Devonian Upper Keziletai Group; 7—Quartz sandstone with gravel of Middle Devonian Lower Keziletai Group; 8—Stratigraphic boundary; 9—Measured and inferred fault; 10—Orebody

上覆于 D2kza 地层之上。

矿区断裂构造发育,NNW 向断裂(F1)为矿区主干断裂构造,控制矿区地层走向,具同生构造特征,对矿区矿化有直接的控制作用。NEE 向断裂(F2)产于矿

区南部,该断裂早期与 F1 断裂为一组配套构造,具先张后压扭的演化特征。矿区发育有铁克里克倒转向斜,形成了区内断裂加单斜层的构造格局。研究区无大规模岩浆活动,仅在矿区外围见少量辉绿岩脉出露。

铁克里克矿区主要以铜、铅矿化为主,均赋存于中泥盆统克孜勒陶上亚组第一岩性段(D_2kz^{b-1})石英砂岩中,沿地层走向呈层状展布,层位控矿特征明显。层位空间上铅矿带在上,铜矿带在下,两者渐变过渡。矿带内圈出 3 条矿体,其中 2 号矿体为主矿体,矿体基本顺层产出,但受 F1, F2 断层控制,倾向 240° 左右,倾角 $43^{\circ}\sim 75^{\circ}$,延伸约 1400 m,平均厚度 20 m,平均品位 3%,推算资源量可达 $5\times 10^5\text{ t}^{[9]}$ 。

矿区内矿石矿物主要有方铅矿、黄铜矿、黄铁矿,少量辉铜矿,表生氧化形成蓝铜矿。脉石矿物主要为石英、方解石。矿石的结构主要有交代残余结构、自形晶结构等。矿石的构造主要有浸染状、脉状、块状等。矿体的围岩蚀变主要有白云石化,方解石化和硅化,其中硅化与矿化关系紧密。

尽管前人多将铁克里克矿床归入密西西比河谷型,但其在控矿构造、矿石组构等方面存在明显差别。断裂构造不仅控制地层展布,同时也控制矿体分布,矿化沿断裂带发育,矿体呈脉状,似层状,与围岩整合接触。矿石矿物中大量出现 MVT 型矿床中少有的黄铜矿。矿石结构中交代残余结构也表现出后期改造的特征。

2 稳定同位素特征

硫铅同位素分析是示踪成矿物质来源,了解矿床

成因的重要手段^[11]。本次研究工作在光片鉴定后选取铁克里克 3 件新鲜矿石样品破碎选取方铅矿单矿物送核工业北京地质研究院分析测试中心进行硫、铅同位素测试,并收集了公开发表的文献中 7 件样品的测试结果,一同进行研究。

2.1 硫同位素特征

表 1 所列为铁克里克矿床 10 件硫、铅同位素测试结果。由表 1 可知,研究区硫化物 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 的范围为 $+8.2\times 10^{-3}\sim -7.6\times 10^{-3}$,在分布直方图上呈现出两个相对聚集区(见图 2)。

硫同位素分析结果显示,方铅矿和黄铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 正值集中区范围为 $0.53\%\sim 0.82\%$,硫可能来源于盆地热卤水或蒸发岩^[12];另一个由方铅矿、黄铁矿和黄铜矿组成的集中区范围为 $-0.46\%\sim -0.76\%$,可能反映硫来源于有机质^[13]。 $\delta^{34}\text{S}$ 值这种分布特征表明矿石中硫可能存在不同的来源,也反映成矿过程中可能存在两种不同的成矿环境,其一对应低 $\delta^{34}\text{S}$ 值、富轻硫、还原性的富有机质沉积成岩环境,其二对应较高 $\delta^{34}\text{S}$ 值、富含金属离子的地下热卤水环境。

2.2 铅同位素

铅同位素测试结果见表 2。结果表明研究区 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 38.106~38.474 之间,平均值为 38.294,标准差为 0.136; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 15.597~15.693 之间,平均值为 15.641,标准差为 0.027;

表 1 铁克里克矿床矿石硫化物硫、铅同位素组成

Table 1 Sulfur and lead isotopic compositions of ore sulfides from Tiekelike deposit

Sample No.	Test object	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\delta^{34}(\text{S}_{\text{CDT}})/10^{-3}$
TKLK-28	Galena	17.972	15.623	38.197	9.39
TKLK-29	Galena	17.960	15.611	38.161	9.35
TKLK-30	Galena	17.944	15.597	38.106	9.39
TKLK-23	Galena	18.080	15.680	38.474	9.39
TKLK-914	Galena	18.032	15.688	38.414	9.47
TKLK-916	chalcopyrite	18.013	15.603	38.201	9.36
TKLK-917	Pyrite	17.980	15.604	38.145	9.38
TKLK-918	Galena	18.035	15.693	38.435	9.42
TKLK-919	chalcopyrite	18.141	15.615	38.404	9.42
TKLK-921A	Galena	18.020	15.692	38.407	9.36

测试单位:核工业北京地质研究院分析测试研究中心,TKLK-铁克里克矿床(其中 1-3 测试数据来自于本研究,4-10 测试数据来自文献[10])。

TKLK-Tiekelike deposit; 1-3 testing data sourcing from this paper are tested by Analytical Laboratory of BRIUG, 4-10 testing data come from Ref. [10].

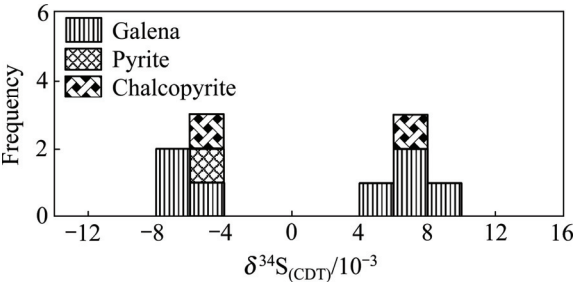


图2 铁克里克矿床矿石硫化物的硫同位素直方图

Fig. 2 Sulfur isotopic histograms of ore sulfides from Tiekelike deposit

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 17.944~18.141 之间, 平均值为 18.018, 标准差为 0.031。

利用 H-H 单阶段铅演化模式^[14], 根据 Geokit 软件^[15]计算出铅同位素各特征参数(见表 3)计算值, 使用的参数值为 $\alpha_0=9.307$, $\beta_0=10.294$, $\gamma_0=29.476$, 地球年龄值 $T=4.43\text{ Ga}$ 。整个矿区的铅模式年龄值介于 379.0~561.0 Ma, 平均值 496.9 Ma。 Th/U 值范围 3.84~3.96 之间, 变化范围很窄, 表现出稳定铅同位素的特征。 μ 值($^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$)介于 9.49~9.72 之间, 变化范围也很窄, 这一范围位于地壳 $\mu_c=9.81$ 与原始地幔 $\mu_0=7.80$ 之间, 反映出壳幔混合铅的特征, 利用公式计算出地幔铅所占比例: $\mu=\mu_c(1-X)+\mu_0X$ 。其中, X 为地幔铅所占比例; $1-X$ 为地壳铅所占比例。计算结果见表中地幔组分和地壳组分, 地幔组分为 0.04~0.15, 地壳组分为 0.85~0.96(质量分数)。

表2 铁克里克矿床矿点铅同位素组成的相关参数

Table 2 Lead isotopic characteristic parameters of ore sulfides from Tiekelike deposit

Sample No.	Test object	<i>t</i> /Ma	μ	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	Mass fraction	
								Mantle	Crust
TKLK-28	Galena	508.4	9.56	3.87	75.20	21.32	41.7	0.12	0.88
TKLK-29	Galena	503.1	9.54	3.86	74.04	20.50	40.48	0.13	0.87
TKLK-30	Galena	498.3	9.51	3.84	72.68	19.56	38.76	0.15	0.85
TKLK-23	Galena	498.0	9.66	3.94	60.60	23.60	37.60	0.07	0.93
TKLK-914	Galena	540.0	9.52	3.94	57.80	24.20	36.00	0.13	0.87
TKLK-916	Chalcopyrite	456.0	9.49	3.84	56.70	18.60	30.30	0.15	0.85
TKLK-917	Pyrite	481.0	9.52	3.84	54.80	18.70	28.80	0.13	0.87
TKLK-918	Galena	544.0	9.70	3.95	58.00	24.50	36.60	0.05	0.95
TKLK-919	Chalcopyrite	379.0	9.52	3.87	64.20	19.40	35.80	0.13	0.87
TKLK-921A	Galena	561.0	9.72	3.96	57.80	25.30	37.20	0.04	0.96

相关参数由 Geokit 软件计算得出。
Parameters calculated by Geokit software.

利用铅稳定同位素比值, 绘制铅同位素构造环境判别图(见图 3)。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点图中, 研究区所有铅同位素数据组成投影点均位于上地壳铅演化线左上方和下地壳铅演化线右下侧。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投点图中, 铅同位素数据组成投影点在全部落在造山带演化线之上, 并在上地壳演化线两侧分布。部分投影点落上地壳演化线上方, 表明铅处于 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ 抬升环境中, 暗示铅源不仅仅来源于上地壳, 部分铅源可能来自结晶基底^[16]。样品投影点线性关系较好, 但无等时线趋势, 表明可能存在不同源区正常铅的不完全混合。造山带增长线(图 3 中 B 线)是划分源区的重要分界线, 矿石铅同位素投点于其上方必定含有上地壳成分, 而投点于其下方则表明源于地幔或下地壳, 投点于其附近则表明是各储库的混合源区^[17]。在铅同位素源区判别图中(见图 4), 部分样品密集地集中于下地壳靠近造山带边缘地带。根据上述判断标准可推测研究区铅主要源于各储库的混合, 而且以地壳源区成分为主, 含有少量的地幔成分。

朱炳泉等^[16]根据构造环境与成因不同, 提出了将铅的 3 种同位素表示成同时代地幔的相对偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$, 并通过 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解, 追踪矿石铅的源区, 该模式消除了时间因素的影响, 具有更好的示踪意义。

通过计算得到本区矿石铅与同时代地幔的相对偏差, 投影到过 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解上(见图 5), 样品

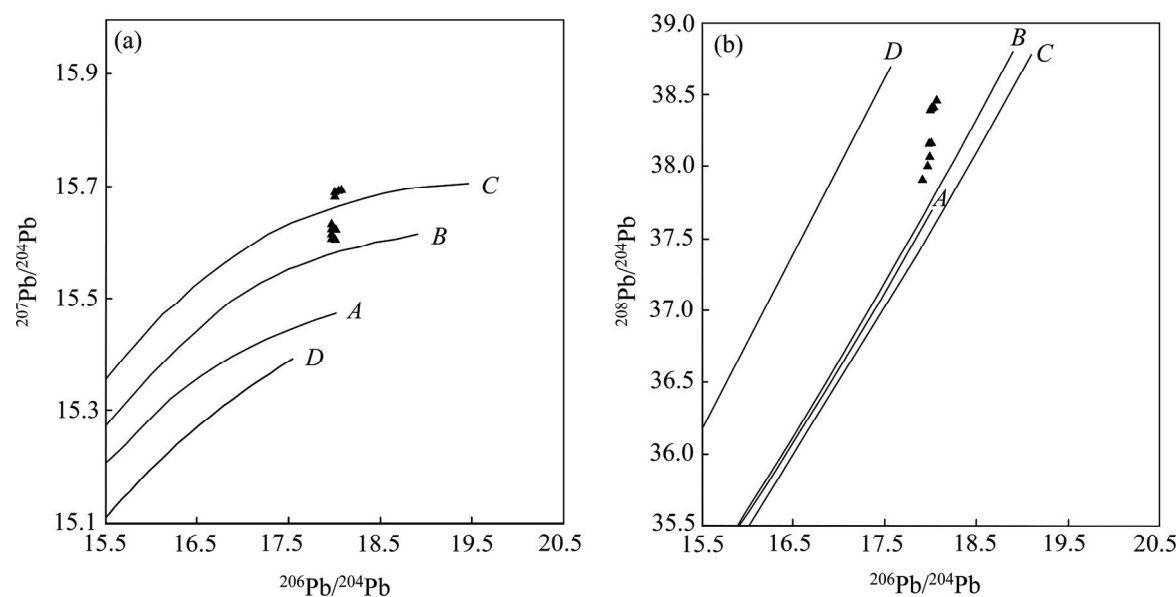


图 3 矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造模式图(底图据文献[18]): A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳

Fig. 3 Diagrams of $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ lead isotopic compositions of Tiekelike deposit (modified from Ref. [18]): A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

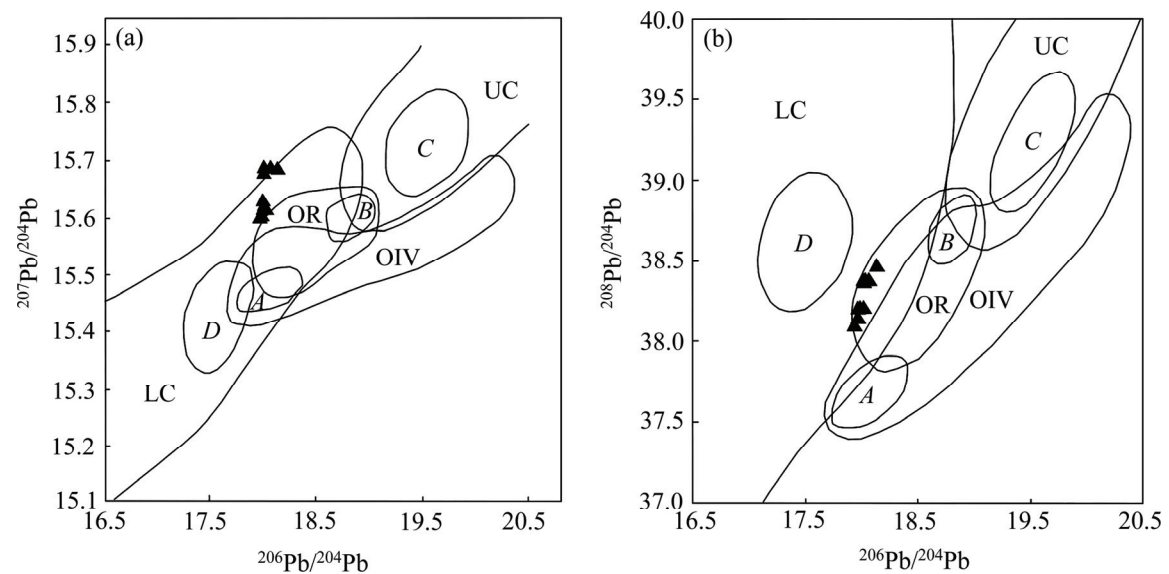


图 4 矿石 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 源区判别图(底图据文献[15]): LC—下地壳; UC—上地壳; OIV—洋岛火山岩; OR—造山带; A, B, C, D 为样品相对集中区

Fig. 4 Sketch map for determination of tectonic source by $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ lead isotopic compositions of Tiekelike deposit (modified from Ref.[15]): LC — Lower crust; UC — Upper crust; OIV — Volcanic rocks of oceanic islands; OR—Orogenic belt; A, B, C, D—Relative centralized area of samples

投影到上地壳与地幔混合的俯冲铅的范围。然而, 该区域未发现强烈岩浆活动, 因此, 该分布特征同样暗示了成矿过程中, 部分铅来自于结晶基底。此外, 所有 10 件硫化物样品的 μ 值为 9.49~9.72(平均 9.57), 其中, 大部分样品的 μ 值小于 9.58, 表明样品中存在低放射性成因深源铅。同时, 这些样品的模式 Th/U 值为 3.84~3.96, 平均 3.89, 大于全球上地壳的平均值 3.88, 说明形成环境不局限于上地壳内^[19]。

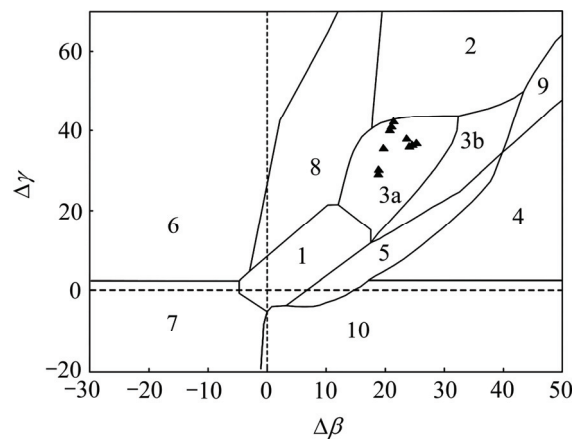


图 5 铁克里克矿床 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ 图解^[16]: 1—地幔源铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲铅(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质

Fig. 5 $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$ diagram of genetic classification of ores from Tekelike deposit^[16]: 1—Mantle lead; 2—Upper crust lead; 3—Mixed upper crust and mantle lead (3a—Magmatism; 3b—Sedimentation); 4—Chemical deposit lead; 5—Submarine hydrothermal lead; 6—Intermediate metamorphic lead; 7—High level metamorphic lead; 8—Orogenic belt lead; 9—Upper crust lead of ancient shale; 10—Retrograde metamorphic lead

3 流体包裹体特征

作为唯一封存在矿物晶格内的古成矿流体, 流体

表 3 铁克里克矿床流体包裹体特征

Table 3 Characteristics of microthermometric samples in Tekelike deposit

Sample No.	Number	Size/ μm	$\varphi_{\text{v}}/\%$ ¹	$t_{\text{m(ice)}}/^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{m(tol)}}/^{\circ}\text{C}$	Density/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
TKLK-3	12	2.0–5.0	10–20	–3.7––15.3	114–214	6.01–18.88
TKLK-5	20	2.5–4.0	15–40	–1.5––10.3	144–284	2.57–14.25
TKLK-19	20	2.0–9.5	10–30	–0.9––21.3	122–258	1.57–23.23
TKLK-20	20	2.5–5.0	5–25	–0.9––25.5	152–234	1.57–24.47
TKLK-21	18	2.5–6.0	5–20	–1.0––25.2	103–207	1.74–24.38
TKLK-23	20	1.5–4.0	15–30	–0.9––6.5	147–257	1.57–9.86
TKLK-26	20	3.5–7.0	5–25	–0.1––25.5	130–246	0.18–24.47
TKLK-31	20	2.5–8.0	10–75	–5.5––16.4	184–269	8.55–19.76

说明: 主矿物均为石英; 1) -20°C ; $\varphi_{\text{v}}/\%$ —包裹体气相占包裹体总体积的分数; $t_{\text{m(ice)}}$ —冰点温度; $t_{\text{h(tol)}}$ —完全均一温度(均一为液相)。

Note: Hosted minerals-quartz; 1) -20°C ; $\varphi_{\text{v}}/\%$ —Fraction of vapor phase of inclusions; $T_{\text{m(ice)}}$ —Final ice melting temperature; $T_{\text{h(tol)}}$ —Homogenization temperature(homogenized by vapor vanished).

包裹体研究是认识成矿流体物理化学性质的最直接手段^[20–21]。本次工作采集了铁克里克矿床矿石中 12 件乳白色含石英脉样品进行包裹体研究, 研究工作中南大学流体包裹体实验室完成。室内将样品磨制成双面抛光的厚片, 厚度约 0.06~0.08 mm。研究采用 Linkam 公司出产的 THMS-600 型地质用冷热台, 温度范围在 $-196\sim 600^{\circ}\text{C}$ 之间, 经标准人工包裹体校准, 温度范围为 $30\sim 600^{\circ}\text{C}$ 时精度为 1°C , $-196\sim 30^{\circ}\text{C}$ 时精度为 0.1°C 。测定了包裹体的均一温度, 并通过水溶液包裹体的冰点温度的测定, 根据 Brown 的 FLINCOR 计算机程序^[22], 采用 Brown-Lamb 的等式^[23]计算水溶液包裹体的盐度和密度。对于冰点温度低于 -21.2°C 的包裹体, 采用 $\text{H}_2\text{O}\text{-NaCl}\text{-CaCl}_2$.exe 计算程序^[24]估算水溶液盐度。

3.1 流体包裹体岩相学分析

矿区内含石英英脉中石英可见原生的气液两相水溶液包裹体。包裹体在室温下(20°C)由盐水溶液及气泡组成, 常温下气相比(V/T)多在 10%~25%, 形态一般不规则状或椭圆状, 大小多在 $3\sim 6\mu\text{m}$, 平均为 $3\mu\text{m}$, 大部分随机孤立分布于主矿物(石英)中。

3.2 流体包裹体显微测温结果

本次研究共测得铁克里克矿床气液两相包裹体 177 个, 测试结果汇总到表 3, 包裹体均一温度介于 $103\sim 284^{\circ}\text{C}$, 集中于 $160\sim 240^{\circ}\text{C}$ 之间; 盐度为 0.18%~24.47%(NaCl, 质量分数), 平均 11.15%; 估算流体密度介于 $0.758\sim 1.120\text{ g/cm}^3$, 平均 0.960 g/cm^3 。

根据上覆地层厚度^[25](约 4.5~5.5 km), 利用静岩

压力估算当时成矿压力约 121.5~148.5 MPa, 平均 135 MPa, 根据不同浓度的 NaCl 溶液的均一温度与压力关系^[26]对所测得包裹体均一温度进行校正, 校正值约 120 °C, 由此估算捕获温度约 222~406 °C, 集中于 280~360 °C 之间。较高的温度可能与研究区盆地底部热对流或矿床基底岩石中深部流体循环上升导致地温梯度异常有关^[27]。

根据铁克里克矿床的均一温度及盐度关系散点图(见图 6), 发现研究区包裹体盐度有两个相对集中的区域, 高盐度包裹体盐度值集中于 18%~24% 之间, 而低盐度包裹体盐度值集中于 4%~8%, 相差悬殊的盐度区间说明矿区内至少存在两种成矿流体。高盐度的流体可能来源于蒸发环境中溶解了地层中硫酸盐的具还原性的地下水, 在铁克里克矿床含矿建造中发现石膏层与膏盐假晶存在, 印证了这一说法。而较低盐度的流体可能来源于相对封闭环境下的从沉积地层中萃取了金属离子的热卤水。厚层碎屑岩建造压实作用及华力西期逆冲推覆形成的断裂和褶皱作用产生的热异常使两种不同性质的流体沿断裂及岩石裂隙运移并混溶, 导致流体物理化学性质发生急剧变化, 使过饱和度激增, 造成硫化物的快速沉淀。

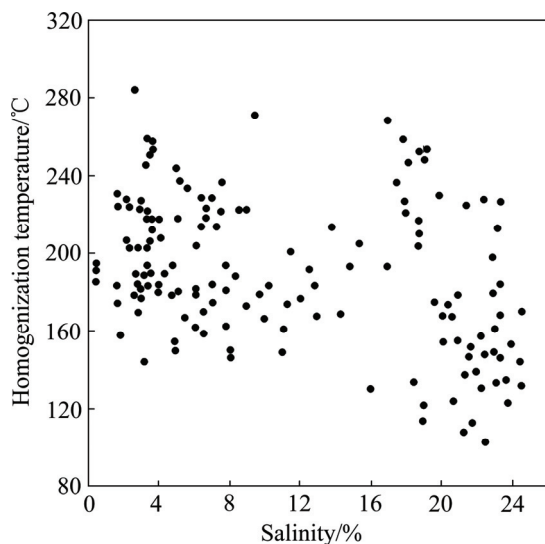


图 6 流体包裹体气液均一温度与盐度关系散点图

Fig. 6 Scatter diagrams of homogenization temperature vs. salinity of fluid inclusions

4 讨论

铁克里克矿床在一定程度上可与典型的密西西比河谷型(MVT)矿床相类比, 但从区域地质背景、矿床特征和成矿作用看来, 有较明显的差异。主要表现在

以下几个方面:

形成环境不相同。铁克里克矿床成矿构造环境前期为稳定大陆台地环境, 后期为盆山转换过程中的非变质环境。陆内活化造山作用及区域性断裂导致的破裂环境下, 叠加在盆地碎屑岩沉积基础上的开放性构造活动产生的热异常, 是成矿流体运移的主要动力条件。而典型的 MVT 型矿床多形成于造山带前陆盆地中, 成矿流体的重要动力条件是相邻造山带的重力驱动^[28-30]。

矿床特征有差异。MVT 型矿床矿体多与赋矿围岩呈不整合接触, 矿体多充填于角砾岩的空隙中。矿石矿物少有黄铜矿出现^[31]。而铁克里克矿床的矿体产在局部的褶皱与断层中的层间破碎带中, 并与构成矿源层的赋矿围岩整合接触, 其矿石结构构造兼具沉积和后期改造特征(交代残余结构)。黄铜矿体位于铅矿体之下, 具一定品位。

成矿作用不相似。铁克里克矿床以两期成矿作用为特色, 前期为海相砂页岩夹碳酸盐岩地层容矿的同生沉积成矿作用。与铁克里克矿床处于同一成矿带的阿帕列克、塔木矿床中黄铜矿、闪锌矿 Re-Os 法、Rb-Sr 法测年数据, 等时线年龄集中于 330 Ma 左右^[32], 与赋矿地层时代吻合, 认为具有同生成矿特征。后期的成矿作用与印支期地台活化有关, 是在褶皱、断裂影响下的热液充填交代作用。铁克里克、喀依孜矿床中黄铜矿、辉钼矿 Re-Os 同位素测年数据给出的等时线年龄处于 210~250 Ma 之间^[32-33], 可以作为印支期热液改造成矿事件的解释。这种后期热液叠加的情况并不罕见, 如美国 Tintic 矿床和广西泗顶铅锌矿床。由此可见, 层状同生沉积成矿被后期热液叠加改造富集也是一种重要的成矿作用类型。

成矿流体特征有差异。铁克里克矿床成矿流体是一种混合流体, 盐度变化较大(0.18%~24.47%), 高盐度的流体可能来源于蒸发环境中萃取了地层中硫酸盐的低 $\delta^{34}\text{S}$ 值、富轻硫、富有机质的地下水。较低盐度的流体可能来源于相对封闭环境下的从沉积地层中萃取了金属离子、具有较高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的热卤水。虽然在本矿区未见大规模岩体出露, 但在附近塔木矿床外围有矿化辉绿岩脉出露, 包裹体较高的捕获温度(280~360 °C)可能与深部小规模岩浆热液活动有关。而 MVT 型矿床成矿流体主要来自盆地热卤水, 高盐度(一般大于 15%), 捕获温度通常不超过 150 °C^[34]。

成矿物质来源不同。铁克里克矿床的成矿物质来源有差异, $\delta^{34}\text{S}$ 组成在 $+8.2 \times 10^{-3}$ ~ -7.6×10^{-3} 之间, 变化较大, 铅同位素特征参数, 铅构造模式示踪及 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 图解示踪表明, 矿区矿石铅主要为壳幔混合的

俯冲铅, 赋矿围岩和下伏结晶基底均提供了成矿物质来源。而典型 MVT 型矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值多在 $+10 \times 10^{-3} \sim +15 \times 10^{-3}$ 之间^[10], 铅同位素组成较单一, 成矿物质主要来自于基底。

总体上, 铁克里克矿床表现出多物质来源、多成矿作用、多成矿阶段、多成因类型等特点, 为典型的多因复成矿床。其构造演化及成矿作用经历了如下阶段。

中泥盆世开始本区较古老的地槽构造层褶皱基底受分散式地幔蠕动拖曳力影响, 拉张形成沉积海盆, 早石炭世在此基础上, 地壳进一步拉张, 形成稳定的陆内沉积盆地。在拉张环境下, 盆地中发育同沉积断层, 金属元素随热液沿同生断裂上升发生喷流沉积作用。此外, 地台阶段相对持续时间较长, 沉积环境稳定, 陆源碎屑源源不断的补给使盆地中沉积了一套砂页岩夹碳酸盐岩组合, 沉积物富集铜铅等成矿元素。最终形成了成矿元素的初始矿源层。

三叠纪开始, 地台活化, 研究区进入地洼阶段。印支期造山运动使西昆仑构造带隆升导致塔南缘盆地发生盆山转换^[35], 汇聚式的地幔蠕动拖曳力造成地壳强烈挤压与大幅度差异升降运动, 在研究区形成大规模逆冲走滑推覆构造和次级构造, 并造成区域性较高的地热梯度。地热加温的地下水在侧向运移的过程中溶解了地层中的膏盐沉积形成地下热卤水, 不仅带来了较高 $\delta^{34}\text{S}$ 值的硫酸盐, 而且萃取了地层中的金属成矿元素, 迁移到富含还原性有机质和低 $\delta^{34}\text{S}$ 值硫化物的层位, 两种流体混合、温度骤降、硫酸盐还原, 造成硫化物的快速沉淀, 最终在构造连通浅部低盐度地下水的层间有利部位成矿。

5 结论

1) 铁克里克矿床隶属新疆库斯拉普铜铅锌成矿带, 位于西昆仑—帕米尔地区东北缘和塔里木盆地西南缘交界部位, 大地构造位置属中亚壳体塔里木地洼区, 演化史漫长复杂。

2) 矿床成矿作用经历地台和地洼两个大地构造阶段, 矿体受地层层位、岩性和构造的多重控制, 主要的成矿作用划分为沉积成矿期及热液改造期。硫铅同位素特征和流体包裹体显微测温研究表明表明该区的成矿物质与成矿流体具有多来源性。

3) 铁克里克矿床在中泥盆世—二叠世沉积环境稳定, 陆源碎屑的补给沉积富集了铜铅等成矿元素, 形成了初始矿源层; 印支期造山运动中, 萃取了地层中

的金属成矿元素的地下热卤水, 沿断裂系统向上迁移, 对原始矿源层进行叠加和改造, 使成矿物质得以进一步富集。因此, 该矿床具备多大地构造阶段、多成矿物质来源、多控矿因素、多成矿作用以及多种成因类型, 具多因复成特点。

REFERENCES

- [1] 李博泉, 王京彬. 中国新疆铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-171.
LI Bo-quan, WANG Jing-bin. The lead-zinc deposits in Xinjiang Province, China[M]. Beijing: Geological Press, 2006: 1-171.
- [2] 王书来, 汪东波, 祝新友, 王京彬, 彭省临. 新疆塔木—卡兰古铅锌矿床成矿流体地球化学特征[J]. 地质地球化学, 2002, 30(4): 34-39.
WANG Shu-lai, WANG Dong-bo, ZHU Xin-you, WANG Jing-bin, PENG Sheng-lin. Ore-fluid geochemistry of the Tamu-Kalangu Pb-Zn ore belt in Xinjiang[J]. Geology-Geochemistry, 2002, 30(4): 34-39.
- [3] 祝新友, 汪东波, 王书来. 新疆阿克陶县塔木—卡兰古铅锌矿带矿床地质和硫同位素特征[J]. 矿床地质, 1998, 17(3): 204-214.
ZHU Xin-you, WANG Dong-bo, WANG Shu-lai. geology and sulfur isotope geochemistry of the Tamu-Kalangu lead-zinc deposits, Akto county, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 1998, 17(3): 204-214.
- [4] 于晓飞. 西昆仑地区造山带区域成矿规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 1-186.
YU Xiao-fei. Study on regional metallogenic laws in western Kunlun orogenic belt[D]. Changchun: Jilin University, 2010: 1-186.
- [5] 胡庆雯, 刘宏林, 朱红英. 塔木—卡兰古铅锌铜(银钴)矿成矿背景探讨[J]. 有色金属, 2008, 60(4): 11-16.
HU Qing-wen, LIU Hong-lin, ZHU Hong-ying. Research on ore forming conditions of Pb-Zn-Cu (Ag-Co) mine in Tamu-Kalangu[J]. Non-Ferrous Metallurgy, 2008, 60(4): 11-16.
- [6] 陈国达. 关于多因复成矿床的一些问题[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(3): 199-201.
CHEN Guo-da. Problems on polygenetic compound deposit[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24(3): 199-201.
- [7] 程晓敢, 黄智斌, 陈汉林, 杜治利, 李康, 师骏. 西昆仑山前冲断带断裂特征及构造单元划分[J]. 岩石学报, 2011, 28(8): 2591-2601.
CHEN Xiao-gan, HUANG Zhi-bin, CHEN Han-lin, DU Zhi-li, LI Kang, SHI Jun. Fault characteristics and division of tectonic units of the thrust belt in the front of the West Kunlun Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 28(8): 2591-2601.
- [8] 陈国达. 地洼学说—活化构造及成矿理论体系概论[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996: 1-455.
CHEN Guo-da. Diwa theory—Outline on activated tectonics and metallogenic theoretic system[M]. Changsha: Press of Central

- South University of Technology, 1996: 1-455.
- [9] 杨振军, 文志伟. 新疆阿克陶县铁克里克铜铅锌多金属矿普查报告[R]. 新疆: 有色金属矿产地质调查中心新疆地质调查所, 2006.
- YANG Zhen-jun, WEN Zhi-wei. Prospecting report of the Tiekelike Pb-Cu polymetallic deposits, Akto county, Xinjiang[R]. Xinjiang: China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Geological Survey in Xinjiang, 2006.
- [10] 张正伟, 彭建堂, 沈能平, 朱笑青, 肖加飞, 刘 燊, 戚华文, 周灵洁. 西昆仑碳酸盐岩层控—改造型铅锌矿床成矿模式与找矿评价[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011: 71-79.
- ZHANG Zheng-wei, PENG Jian-tang, SHEN Neng-ping, ZHU Xiao-qing, XIAO Jia-fei, LIU Shen, QI Hua-wen, ZHOU Ling-jie. Metallogenic model and prospecting evaluation of the carbonate stratabound and reformed Pb-Zn deposits in West Kunlun[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2011: 71-79.
- [11] HOEFS J. Stable isotope geochemistry[M]. New York: Springer-Verlag, 1980: 128-134.
- [12] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-316.
- ZHEN Yong-fei, CHEN Jiang-feng. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-316.
- [13] 张长青, 余金杰, 毛景文, 于 航, 李厚民. 四川赤普铅、锌矿床生物标志化合物特征研究[J]. 沉积学报, 2011, 28(4): 832-848.
- ZHANG Chang-qing, YU Jin-jie, MAO Jing-wen, YU Hang, LI Hou-min. Research on the Biomarker from Chipu Pb-Zn Deposit, Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 28(4): 832-848.
- [14] FATURE G, MENSING T M. Isotopes: Principles and applications[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005: 256-283.
- [15] 路远发. Geokit: 一个用于 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- LU Yuan-fa. Geokit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochimica, 2004, 33(5): 459-464.
- [16] 朱炳泉, 李献华, 戴檀谟. 地球科学中同位素体系理论与应用—兼论中国大陆地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 216-230.
- ZHU Bing-quan, LI Xian-hua, DAI Tong-mo. Isotope system theory and application to the earth sciences—On crust-mantle evolution of continent of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 216-230.
- [17] STACEY J S, HEDLUND D C. Lead-isotope compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implications for early Proterozoic crustal evolution in the western United States[J]. Geol Soc Amer Bull, 1983, 94: 43-57.
- [18] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbotectonics—The model[J]. Tectonophysics, 1981, 75(1/2): 256-283.
- [19] 李 龙, 郑永飞, 周建波. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 61-68.
- LI Long, ZHENG Yong-fei, ZHOU Jian-bo. Dynamic model for Pb isotope evolution in the continental crust of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(1): 61-68.
- [20] 卢焕章, 范宏瑞, 倪 培, 欧光习, 沈 昆, 张文淮. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-486.
- LU Huan-zhang, FAN Hong-rui, NI Pei, OU Guang-xi, SHEN Kun, ZHANG Wen-huai. Fluid inclusions[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-486.
- [21] LAI J Q, CHI G X, PENG S L, SHAO Y J, YANG B. Fluid evolution in the formation of the Fenghuangshan Cu-Fe-Au deposit, Tongling, Anhui, China[J]. Economic Geology, 2007, 102(5): 949-970.
- [22] Brown P E. FLINCOR: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data[J]. American Mineralogist, 1989, 74: 1390-1393.
- [23] BROWN P E, LAMB W M. P-V-T properties of fluids in the system H_2O-CO_2-NaCl : New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989, 53 (6): 1209-1221.
- [24] CHI G X, NI P. Equations for calculation of $NaCl/(NaCl+CaCl_2)$ ratios and salinities from hydrohalite-melting and ice-melting temperatures in the $H_2O-NaCl-CaCl_2$ system[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(1): 33-37.
- [25] 蔡土赐. 新疆维吾尔自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 219-290.
- CAI Tu-ci. Lithostratigraphy of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 219-290.
- [26] POTTER R W II. Pressure correction for fluid inclusion homogenization temperature based on the volumetric properties of the system $NaCl-H_2O$ [J]. J Res V S Geol Surv, 1977, 5: 603-607.
- [27] LEACH D L, SANGSTER D F, KELLEY K D, LARGE R R, GARVEN G, ALLEN C R, GATZMER J, WALLTERS S. Sediment-hosted lead-zinc deposit: A global perspective[J]. Economic Geology 100th Anniversary Volume, 2005, 100(1): 561-607.
- [28] APPOLD M S, GARVEN G. Mineralogical thermodynamic constraints on the metasomatic origin of the York River nepheline gneisses, Bancroft, Ontario[J]. Canadian Mineralogist, 1999, 29: 913-936.
- [29] GARVEN G. The role of regional fluid flow in the genesis of the pine point deposit, western Canada sedimentary basins[J]. Economic Geology, 1985, 80(2): 307-324.
- [30] GE S, GARVEN G. Hydromechanical modeling of tectonically-driven groundwater flow with application to the Arkoma basin[J]. Geophys Res, 1992, 97(B6): 9119-9144.
- [31] LEACH D L, SANGSTER D F. Mississippi Valley-type lead-zinc deposits[J]. Geological Association of Canada Special Paper, 1993, 40: 289-314.
- [32] 张正伟, 漆 亮, 沈能平, 游富华, 张中山, 周灵洁. 西昆仑阿巴列克铜铅矿床黄铜矿 Re-Os 定年及地质意义[J]. 岩石学报,

- 2011, 27(10): 3123–3128.
ZHANG Zheng-wei, QI Liang, SHEN Neng-ping, YOU Fu-hua, ZHANG Zhong-shan, ZHOU Ling-jie. Re-Os isotopic dating of chalcopyrite from the Abaliek copper-lead deposits in West Kunlun, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 3123–3128.
- [33] 刘建平, 王 核, 李社宏, 全来喜, 任广利. 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*, 2010, 26(10): 3095–3105.
LIU Jian-ping, WANG He, LI She-hong, TONG Lai-xi, REN Guang-li. 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*, 2010, 26(10): 3095–3105.
- [34] 刘英超, 侯增谦, 杨竹森, 田世洪, 宋玉财, 杨志明, 王召林, 李 政. 密西西比河谷型 MVT 铅锌矿床认识与进展[J]. *矿床地质*, 2008, 27(2): 253–264.
LIU Ying-chao, HOU Zeng-qian, YANG Zhu-sen, TIAN Shi-hong, SONG Yu-cai, YANG Zhi-ming, WANG Zhao-lin, LI Zheng. Some insights and advances in study of Mississippi Valley-type (MVT) lead-zinc deposits[J]. *Mineral deposits*, 2008, 27(2): 253–264.
- [35] 陈守建, 李荣社, 计文化, 赵振明, 刘荣丽, 贾宝华, 张振福, 王国灿. 昆仑造山带二叠纪岩相古地理特征及盆山转换讨论[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 374–393.
CHEN Shou-jian, LI Rong-she, JI Wen-hua, ZHAO Zhen-ming, LIU Rong-li, JIA Bao-hua, ZHANG Zhen-Fu, WANG Guo-can. The Permian lithofacies paleogeographic characteristics and basin-mountain conversion in the Kunlun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 2010, 37(2): 374–393.

Polygenetic compound mineralization of Tiekelike copper-lead-zinc deposit, Xinjiang

ZHANG Chen-guang¹, LAI Jian-qing¹, CAO Yong-hua^{1,2}, LIU Yin-ming¹, YANG Jin-ming³, HAN Yong-sheng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geoscience and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Department of Earth Sciences, University of Western Ontario, London, Ontario N6A5B7, Canada;

3. Xinjiang Institute of Geological Survey, China Non-Ferrous Metals Resource Geological Survey, Urumqi 830000, China)

Abstract: The Tiekelike copper-lead-zinc polymetallic deposit is located in Tarim Diwa region, Central Asian Crustobody. It has experienced several continental tectonic and metallogenic stages, and belongs to the significant copper-lead-zinc deposit in the Kusilapu mineralizing belt of West Kunlun. Based on analysis of the geologic settings of Tiekelike deposits, the fluid inclusions were systematically researched, the features of sulfur and lead isotopes were studied, and the characteristics of mineralization fluids and the sources of minerals were discussed. The results show that the $\delta^{34}(\text{S}_{\text{CDT}})$ values of ore minerals distribute widely (from $+8.28 \times 10^{-3}$ to -7.6×10^{-3}). The homogenization temperatures of the fluid inclusions vary from 103 °C to 284 °C. The salinities range from 0.18% to 24.47% (mass fraction, $\text{NaCl}_{\text{equiv}}$). The features of fluid inclusions and sulfur isotopes indicate that the ore-forming fluids has several sources. According to the lead isotope tracer analysis, the conclusion is draw that the lead is mostly subducting lead mixed by crustal and mantle material, the major mineralizing material comes from ore-bearing host rocks and the underlain basement. The Tiekelike copper-lead-zinc polymetallic deposit is a typical syndepositional -hydrothermal transforming complex deposit, which is characterized by the multiple mineralizing continental structural stages, the multiple ore-forming material and the multiple mineralizations.

Key words: fluid inclusions; sulfur and lead isotope; polygenetic compound deposit; Tiekelike

Foundation item: Project(2011BAB06B05-04) supported by the National 12th Five-year Plan of Science and Technology; Project(2015CX008) supported by the Grants from the Project of Innovation-driven Plan in Central South University, China

Received date: 2015-09-28; **Accepted date:** 2016-02-25

Corresponding author: LAI Jian-qing; Tel: +86-13875983805; E-mail: lj@csu.edu.cn

(编辑 王 超)