

doi: 10.6053/j.issn.1001-1412.2016.02.004

青海祁漫塔格肯德可克多金属矿床 硫、铅同位素特征及成因意义

陶诗龙^{1,2}, 赖健清^{1,2}, 黄敏^{1,2,3}

(1. 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与
信息物理学院, 长沙 410083; 3. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 肯德可克矿床是祁漫塔格成矿带中一个重要的铁多金属矿床。其硫化物矿石的硫同位素测试结果显示, $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-2.0 \times 10^{-3} \sim +5.96 \times 10^{-3}$ 之间, 平均为 $+1.65 \times 10^{-3}$, 与岩浆硫的范围较吻合。铅同位素 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 38.176~38.699 之间, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 15.602~15.713 之间, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值介于 18.460~18.703 之间; $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值介于 3.55~3.75 之间, 表现出稳定铅同位素特征; μ 值变化范围为 9.48~9.75, 在原始地幔 ($\mu_0 = 7.80$) 与地壳 ($\mu_c = 9.81$) 之间, 充分反映壳幔混合铅的特征; 估算地壳和地幔中铅组分数分别为 0.82~0.97 和 0.03~0.18, 推断矿床铅质主要为地壳成分为主、含少量地幔成分的岩浆岩, 即壳幔混合源。结合矿床地质特征及前人研究成果, 认为此矿床以夕卡岩型为主体的多金属矿床。

关键词: 肯德可克矿区; 硫同位素特征; 铅同位素特征; 成矿物质来源; 祁漫塔格; 青海省

中图分类号: P588.12; P597 **文献标识码:** A

0 引言

肯德可克多金属矿床位于祁漫塔格成矿带东部, 是一个以 Fe 矿为主并伴生 Co、Bi、Ag、Cu、Pb、Zn、Au 等多金属的综合型矿床。前人对该矿床的地质特征、成矿条件及控矿因素、成矿物质来源及矿床成因均做了较详细的研究; 但在矿床成因及成矿物质来源方面仍存在争议。潘彤等针对矿区及外围近地表无侵入岩体, 岩浆活动不发育的现象, 结合矿床地质特征, 认为肯德可克矿床为火山喷流热水沉积改造矿床^[1]。李宏录等^[2]、潘彤^[3]、蔡岩萍等^[4]对矿区围岩和硅质岩进行微量、稀土地球化学研究, 结果表明

肯德可克矿床具喷流沉积特征, 且后期遭受叠加改造^[2-4]。有些学者根据矿区典型岩石结构构造、矿物组合及矿化特征, 利用电子探针及硫同位素分析, 发现矿床受地层和构造控制, 认为矿床在热水喷流沉积基础上, 叠加了夕卡岩成矿作用, 且后者认为硫为深源流, 指示成矿物质来源于地幔^[5-6]。肖焱等^[7]通过硫同位素特征分析认为成矿物质来源于岩浆。黄敏等^[8]通过铅同位素特征分析认为成矿物质源于深部且具有多源混染特征。

本文是笔者在前人已有工作基础上, 通过对肯德可克铁多金属矿床地质特征的进一步认识, 并综合运用硫、铅同位素来探讨成矿物质来源和演化, 以期深入了解矿床成因。

收稿日期: 2015-08-03; **收回日期:** 2015-11-02; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划重大项目(编号: 2006BAA01B06)和中国地质调查局项目(编号: 资[2008]青藏 21-03、编号: 资[2011]03-01-64)联合资助。

作者简介: 陶诗龙(1992—), 男, 中南大学在读研究生, 研究方向矿产普查与勘探。通信地址: 湖南省长沙市岳麓区中南大学校本部地学楼 409 室; 邮政编码: 410083; E-mail: taoshl@qq.com

通信作者 赖健清(1964—), 男, 教授, 博士, 研究方向矿床学、流体包裹体, 从事矿床学教学及科研工作。通信地址: 湖南省长沙市岳麓区中南大学地球科学与信息物理学院; 邮政编码: 410083; E-mail: ljql@csu.edu.cn

1 成矿地质概述

祁漫塔格地区地处东昆仑造山带西段,是特提斯与古亚洲构造域结合部位。该区经历古陆裂解,大洋玄武岩高原形成,“洋盆闭合-俯冲碰撞-边缘增生”,差异缝合造山,岩石圈拆沉和岩浆底侵等主要大地构造演化活动^[9]。祁漫塔格地区地质构造演化最重要时期为加里东期至海西-印支期,印支期因其强烈壳幔相互作用成为该区最重要的热液矿床形成期^[10]。区内出露地层有前寒武系、奥陶-志留系、石炭-二叠系、三叠系,并以奥陶-志留系、石炭-二叠系、三叠系为主^[11]。区内构造发育,以NNW向和近EW向断裂为主。区内岩浆岩活动强烈,以中酸性为主。区内矿床种类多样,以夕卡岩型和斑岩型矿床为主^[12]。

肯德可克铁多金属矿区内出露地层主要有奥陶-志留系滩间山群(O-ST),上泥盆统牦牛山组(D₃m)角砾岩,石炭系(C)结晶灰岩、白云质大理岩碳酸盐岩,第四系(Q)坡积物(图1)。滩间山群为大

理岩、白云质大理岩、硅质岩、杂砂岩、含碳钙质板岩,属含碳酸盐岩的火山-沉积岩系;滩间山群是肯德可克夕卡岩铁多金属矿床的含矿地层。区内构造为由滩间山群、上泥盆统和石炭系组成的轴向近EW的肯德可克向斜,肯德可克矿区就位于其北翼(地层近EW走向,倾向北,倾角50°~70°),且发育有走向EW、NE和NNW向三组断裂构造。其中,EW向断裂规模较大、形成较早,多沿硅质岩和含碳钙质板岩接触带附近延伸,控制了区内含矿夕卡岩的分布,即EW向断裂为矿质“活化提取-运移-沉淀-富集”提供了条件,是矿区重要的控矿、储矿构造;NE及NNW向断裂形成较晚,对一些矿体起破坏作用^[8]。矿区岩浆活动不甚发育,地表仅可见部分规模较小的石英正长斑岩和闪长岩,但在矿区深部钻孔岩芯和坑道中可见二长花岗岩和闪长玢岩等产出,且野外工作发现二长花岗岩与铁多金属矿化具有密切关系;矿区二长花岗岩锆石U-Pb年龄为229.5 Ma±0.5 Ma,其形成时代为晚三叠世^[7]。

矿体以(似)层状、透镜状为主。矿石类型主要有致密块状铁矿石,浸染状、条带状、细脉-网脉状及角砾状磁铁矿石和块状褐铁矿-磁铁矿石。

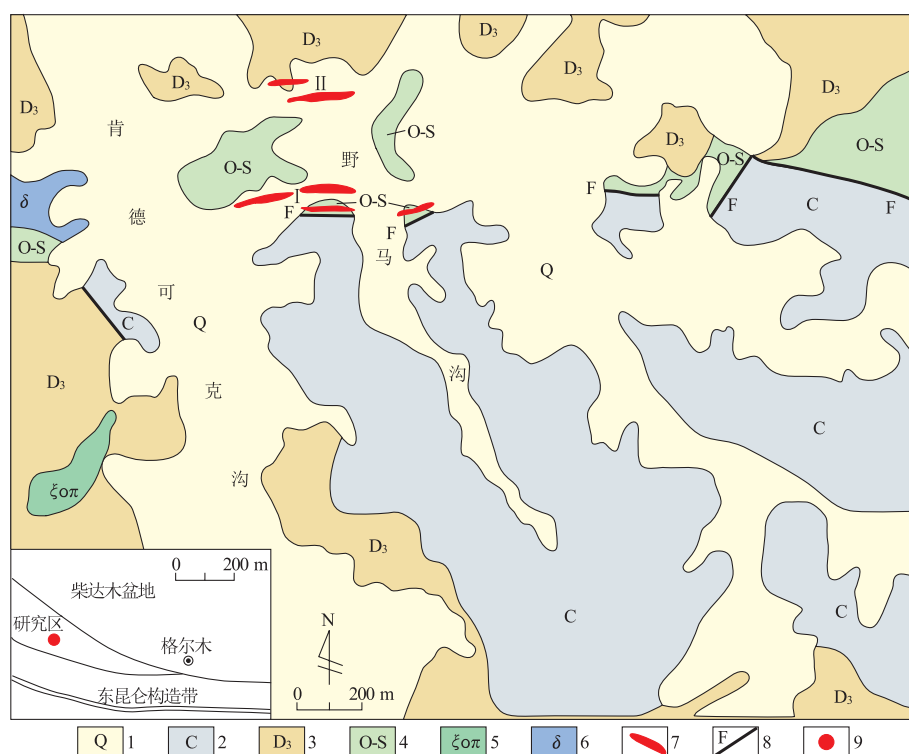


图1 肯德可克矿区地质简图(据文献[13])

Fig. 1 Geological sketch of Kendekek deposit

1. 第四系; 2. 石炭系; 3. 上泥盆统牦牛山组; 4. 奥陶-志留系滩间山群;
5. 石英正长斑岩; 6. 闪长岩; 7. 矿体; 8. 断层; 9. 矿区

矿石组构方面,具有它形、半自形和自形粒状结构、碎裂结构、交代结构及反应边结构;具有块状构造、团块状、浸染状、细脉状、胶状和变胶状、斑杂状、条带(纹)状、角砾状构造。

围岩蚀变类型主要为夕卡岩化、碳酸盐化和硅化,且与 Fe、Zn 矿化密切。

2 硫、铅同位素特征

2.1 样品采集及测试方法

本次研究工作中的样品主要为采集于肯德可克矿区的黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿及铅锌矿石。样品处理、测试方法及精度等详见文献[14]。硫同位素采用 V-CDT 国际标准,与 CDT 国际标准等效。

2.2 硫同位素特征

本次测试的 4 件样品(黄铜矿、黄铁矿及磁黄铁矿)硫同位素特征值见表 1。结合前人^[2,6-7]的测试数据可知,矿区 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值变化范围较大,从 $-2.0 \times 10^{-3} \sim +5.96 \times 10^{-3}$,平均为 $+1.65 \times 10^{-3}$,主要以正值为特征。根据上述数据作出矿区硫同位素分布直方图(图 2),矿区总硫跨度较大,但大体上呈塔式分布,表明矿床硫源仍较为单一。

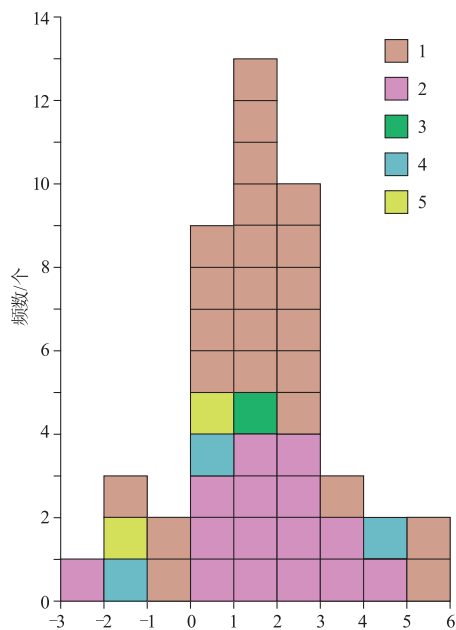


图 2 肯德可克矿区硫同位素直方图
(数据来源于文献[2,6-7]及本次研究)

Fig. 2 Histogram of S isotope values
in Kendekeke deposit

1. 黄铁矿; 2. 磁黄铁矿; 3. 闪锌矿; 4. 黄铜矿; 5. 方铅矿

表 1 肯德可克铁多金属矿床硫同位素值

Table 1 Values of S isotope in
Kendekeke polymetallic deposit

样号	测试对象	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/10^{-3}$
DC3-1	黄铜矿	4.7
DC4-1	黄铁矿	-0.5
DC6-3	黄铜矿	0.7
DC6-6	磁黄铁矿	1.3

测试单位:核工业北京地质研究院分析研究测试中心,2014。

硫同位素要用作示踪成矿物质来源需要满足两个条件:①达到分馏平衡;②矿石硫同位素值与热液硫同位素值相同。硫同位素平衡条件为按照辉钼矿、方铅矿、斑铜矿、黄铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、黄铁矿、辉钼矿的次序^[15] $\delta^{34}\text{S}$ 逐渐容易富集。肯德可克矿区主要硫化物矿物中 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围中等:24 个黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-1.66 \times 10^{-3} \sim +5.96 \times 10^{-3}$ 之间,均值为 $+1.84 \times 10^{-3}$;15 个磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-2 \times 10^{-3} \sim +4.03 \times 10^{-3}$ 之间,均值为 $+1.71 \times 10^{-3}$;3 个黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-1.66 \times 10^{-3} \sim +4.7 \times 10^{-3}$ 之间,均值为 $+1.25 \times 10^{-3}$;2 个方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 -0.33×10^{-3} ;1 个闪锌矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+1.46 \times 10^{-3}$ 。显然,矿区主要矿石矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 同位素富集遵循硫同位素平衡条件;根据大本模式^[16]磁黄铁矿-黄铁矿-方解石组合可认为区内矿石硫化物硫同位素满足条件②。因此,肯德可克矿区矿石矿物硫同位素可用作示踪成矿物质来源判别。

2.3 铅同位素特征

本次铅同位素研究在黄敏等^[8]的基础上,补测了 5 件样品(黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿及黄铜矿)的铅同位素比值,测试数据见表 2 所述。数据表明,矿区稳定铅同位素的三个比值: $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $38.176 \sim 38.699$,均值为 38.389 ,标准差为 0.158 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $15.602 \sim 15.713$,均值为 15.658 ,标准差为 0.043 ; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 $18.460 \sim 18.703$,均值为 18.592 ,标准差为 0.068 。据单阶段铅演化模式,运用 Geokit 软件^[17]计算出矿区铅同位素各特征参数如表 2 所示。计算中运用的参数值除成矿年龄 230 Ma ^[7]外,其余均为默认值。整个矿区铅模式年龄 $60 \text{ Ma} \sim 195 \text{ Ma}$,均值为 106 Ma ,与肖焯等^[7]所测成矿年龄相差较大;同时表明存在严重的壳幔混合现象。 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值范围为 $3.55 \sim 3.75$,表现出稳定铅同位素特征。 μ 值变化范围也很小,为 $9.48 \sim 9.75$,介于原始地幔($\mu_0 = 7.80$)与地壳($\mu_c = 9.81$)之间^[14],充分反映了壳幔混合铅的特征。

地质体中不含或含有极少量的放射性铅则该地质体中铅同位素可用于判断成矿物质来源^[18]。肯德可克矿区稳定铅同位素的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb三个比值变化范围很小,均小于0.160,表明矿区铅同位素中放射性成因铅含量很少,且 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值变化范围很小,仅为3.55~3.75,故矿区铅同位素可用于探讨成矿物质来源及演化。

利用矿区硫化物稳定铅同位素的三个比值作铅同位素组成图解(图3),在图3(a)中,投点主要落在造山带和上地壳之间,仅有少量落在上地壳线上方;

在图3(b)中,绝大多数投点落在造山带附近的下地壳和上地壳之间;铅同位素²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb—²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb构造环境判别图解(图4)反映,矿区样品铅同位素源于造山带环境。

铅同位素 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ 成因分类图解是针对我国特殊地质特征而提出,能够较为准确地判断成矿物质来源^[18]。根据表2中的 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 值所作出的 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ 图解,如图5所示;由图5可知,研究区样品均落在与岩浆作用相关的上地壳与地幔混合的俯冲铅源区,且投点总体上呈一直线分布。

表 2 肯德可克铁多金属矿床铅同位素值

Table 2 Values of Pb isotope in Kendekeke polymetallic deposit

样号	样品	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	<i>t</i> /Ma	μ	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$	<i>X</i>	1— <i>X</i>	备注
DC3-1	Ccp	18.621	15.671	38.473	103	9.58	3.66	90.75	22.96	36.73	0.11	0.89	①
DC4-1	Py	18.656	15.686	38.474	96	9.61	3.64	92.80	23.94	36.75	0.10	0.90	①
DC5-1	Mag	18.583	15.652	38.372	106	9.55	3.63	88.53	21.72	34.01	0.13	0.87	①
DC6-3	Ccp	18.630	15.713	38.699	149	9.66	3.75	91.28	25.70	42.82	0.07	0.93	①
DC6-6	Po	18.460	15.622	38.336	158	9.50	3.67	81.32	19.76	33.04	0.15	0.85	①
KD02	Gn	18.560	15.602	38.176	60	9.45	3.55	87.18	18.45	28.72	0.18	0.82	②
KD04-1	Py	18.703	15.761	38.687	155	9.75	3.72	95.56	28.83	42.49	0.03	0.97	②
KD05	Py	18.615	15.645	38.296	74	9.53	3.58	90.40	21.26	31.96	0.14	0.86	②
KD05	Mag	18.617	15.643	38.347	70	9.53	3.60	90.52	21.13	33.33	0.14	0.86	②
KD06	Py	18.576	15.618	38.271	68	9.48	3.59	88.12	19.5	31.28	0.16	0.84	②
KD07	Mag	18.594	15.625	38.237	64	9.49	3.57	89.17	19.96	30.37	0.16	0.84	②
KM-4	Mag	18.464	15.654	38.361	195	9.56	3.69	81.56	21.85	33.71	0.12	0.88	②
KM-5	Gn	18.621	15.657	38.328	85	9.55	3.60	90.75	22.04	32.82	0.13	0.87	②

注:①本次研究测试数据,测试单位为核工业北京地质研究院分析研究测试中心,2014;②前人数据,原始数据来源于文献[8];参数由 Geo-kit 软件计算得出;*t*:模式年龄, μ :矿床中的²³⁸U/²⁰⁴Pb, $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 分别为²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb与同时代地幔比值的相对偏差;Ccp.黄铜矿,Py.黄铁矿,Mag.磁铁矿,Po.磁黄铁矿,Gn.方铅矿

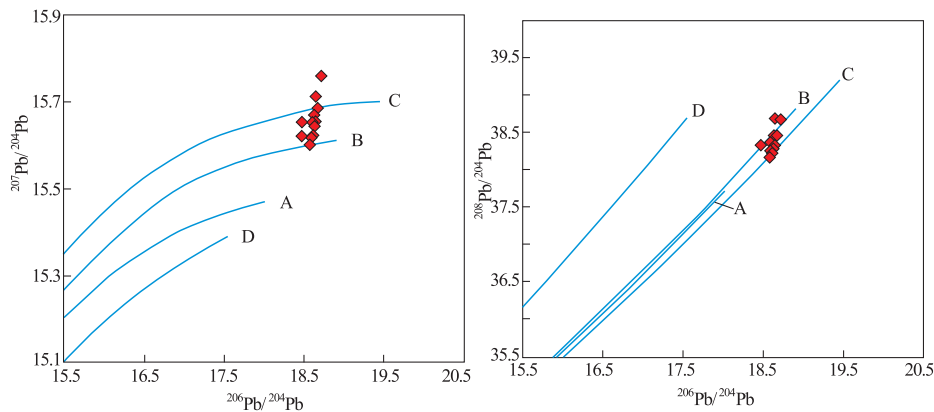


图 3 肯德可克多金属矿床铅同位素组成图解
(底图据文献[19])

Fig. 3 Diagrams of Pb isotope compositions in Kendekeke polymetallic deposit
A: 上地幔; B: 造山带; C: 上地壳; D: 下地壳

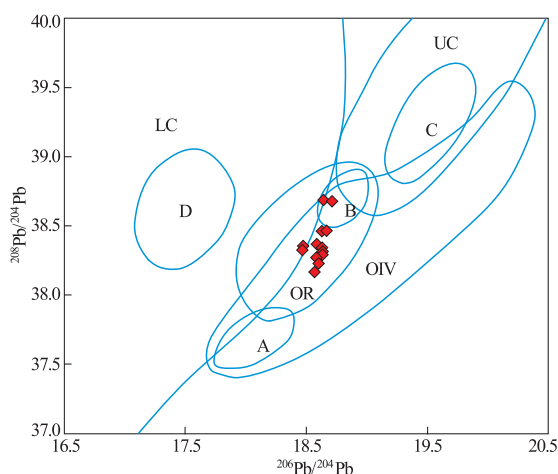


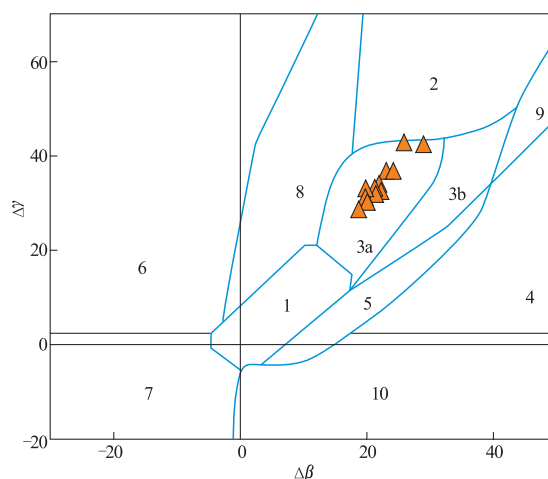
图4 肯德可克铁多金属矿床

 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境判别图解

(底图据文献[19])

Fig. 4 Diagram for discrimination of tectonic setting by Pb isotopes in Kendekeke polymetallic deposit

LC. 下地壳; UC. 上地壳; OIV. 洋岛火山岩; OR. 造山带

图5 肯德可克多金属矿床 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ 成因分类图解

(底图据文献[18])

Fig. 5 $\Delta\beta$ — $\Delta\gamma$ diagram showing genetic classification of Kendekeke polymetallic deposit

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. 化学沉积型铅; 5. 海底热水作用用铅; 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

3 成矿物质来源及成因浅析

3.1 硫的来源

前人对肯德可克矿区硫同位素的研究较多,不同学者所获得的 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围不太一致,所得结论也不相同。伊有昌等^[6]得到 $\delta^{34}\text{S}$ 值多为正值,据此认为成矿物质来源于地幔,成矿流体向上运移过程中混入少量壳源硫;李宏录等^[2]得到 $\delta^{34}\text{S}$ 值多为正值,对比认为矿床为夕卡岩型矿床;肖烨等^[7]所得 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近与零,认为成矿物质为岩浆来源。

莫宣学等^[20]指出显生宙期间东昆仑造山带发生过幔源岩浆底侵及壳-幔岩浆混合作用;莫宣学等^[20]、殷鸿福等^[21]认为:晚古生代东昆仑地区出现拉张引起的阿尼玛卿洋盆,该洋盆于海西晚期—印支早期向北俯冲、消减,至中三叠世闭合形成三叠世前陆堆积;与此同时,昆北地区发生大面积海西—印支期花岗岩侵入活动,形成活动陆缘;古特提斯陆缘不断增生,石炭纪—三叠纪初,出现与洋壳俯冲有关的火山喷发和岩浆侵入作用。肖烨等^[7]指出东昆仑地区在230 Ma~260 Ma期间处于碰撞造山阶段,而矿区与成矿密切的花岗岩测年数据(204 Ma~237 Ma)刚好处在碰撞造山阶段晚期。此时,区域岩浆源区已经混合充分,成为成熟的岩浆,通过侵入等作用形成与成矿有关的岩体。肯德可克矿区内的

花岗岩中由于幔源物质底侵发育暗色包体,亦说明具有壳幔混合特征。

本次硫同位素研究在前人工作的基础上,选取具有代表性的硫化物矿物样品进行硫同位素测试。由表1及图2可知, $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大,从 $-2.0 \times 10^{-3} \sim +5.96 \times 10^{-3}$,峰值集中在 $0 \sim +3 \times 10^{-3}$ 之间,以正值为特征。总体而言,矿区 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显与岩浆熔体硫同位素组成($-3 \times 10^{-3} \sim +7 \times 10^{-3}$)范围吻合^[22],表明矿床成矿物质主要来源于岩浆。前人对矿区岩浆岩从主量、微量及稀土元素等方面均做过深入研究,黄敏等^[8]研究与成矿密切相关的花岗岩,分析指出矿区花岗岩为壳幔混合的I型花岗岩。故矿区硫主要来源于的岩浆,部分来自围岩,岩浆岩具有壳幔混合特征,这与区域上的构造岩浆活动是一致的。前人^[23-24]研究指出,祁漫塔格地区夕卡岩型矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-2.1 \times 10^{-3} \sim +10.1 \times 10^{-3}$,成矿物质主要来源于岩浆岩及附近被交代的围岩。本矿区硫同位素值恰好处在范围内,从另一个方面印证了肯德可克矿床主矿床类型为夕卡岩型,成矿物质来源可能以岩浆岩为主,少量源自围岩。

3.2 铅的来源

铅同位素除可以判别铅的来源外,还可以提供硫化物矿石中与铅密切相关的锌、铁、铜等成矿物质

的来源信息^[25]。

通常情况下, $\mu < 9.58$ 的铅为低放射性深源铅, $\mu > 9.58$ 的铅为高放射性壳源^[26]。肯德可克矿区铅同位素 μ 值为 $9.48 \sim 9.75$ (仅有一个数据为 9.75), 均值 9.56 , 说明本区铅同位素同时具有深源铅和壳源铅的特征。 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值范围为 $3.55 \sim 3.75$, 均值 3.63 , 介于中国大陆上地壳平均值 3.47 ^[27] 和全球大陆上地壳平均值 3.88 ^[19] 之间, 可能反映成矿物质主要源于上地壳。根据图 3 中样品投点位置并参考文献^[14,28] 研究成果, 可推测肯德可克矿区矿石铅主要来源于各储库铅的混合, 且该混合源以上地壳成分为主, 含少量地幔成分。

图 3 显示肯德可克矿区矿石铅同位素数据投点几乎都落在上地壳和造山带的演化线之间, 且线性特征较明显; 两个端元分别位于上地壳和上地幔, 且主要集中在上地壳的端元, 表明为上地壳和上地幔铅两端元组份的混合线; 图 4 显示矿区样品铅同位素源于造山带环境。

前人^[20-21,25] 研究认为祁漫塔格地区地壳生长的重要时期是早古生代, 阿尼玛卿洋盆于该时期向下俯冲到东昆仑地块的底部地幔中致使洋壳板块断裂, 下部地幔物质以地幔楔的形式上侵到地壳中; 另外, 残留的洋壳物质等亦成为新增生地壳的一部分, 这些物质一起构成该区造山带物质的岩浆源区。故认为肯德可克矿区深源岩浆源区形成早期可能因洋壳俯冲—挤压作用而混入部分洋壳幔源残留物质并与地壳物质重熔混合, 大规模的构造岩浆活动使岩浆源区成分逐渐成熟, 并以地幔楔形式上侵至造山带根部, 在印支晚期—燕山早期发生构造岩浆演化活动而重熔产生。这与该区印支期大量构造岩浆活动相印证。

铅同位素的 $\Delta\beta - \Delta\gamma$ 成因分类图解具有消除时间因素带来的影响及更精确地界定铅等成矿产物的来源的优势^[25]。从图 5 中可知, 肯德可克矿区硫化物的铅同位素 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 参数投点均落在上地幔与地壳以岩浆作用方式混合的俯冲铅区域内; 吴开兴等^[29] 指出, 俯冲铅属于广义造山带铅的范畴。图 5 中的铅同位素投点构成一条拟合线段, 上下两个端元分别为上地壳铅和地幔铅, 且线段更靠近上地壳铅端元。表明肯德可克矿区铅物质来源于上地壳和地幔, 且以上地壳物质为主。

朱炳泉等^[18] 提出了计算地幔中 Pb 所占比例公式:

$$\mu = \mu_c(1-X) + \mu_0 X \quad (1)$$

其中, μ 为矿床中的 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$; μ_c 为地壳中 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值, 取 $\mu_c = 9.81$; μ_0 为原始地幔中 $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ 值, 取 $\mu_0 = 7.80$; X 为地幔铅所占比例, $1-X$ 为地壳铅所占比例。从表 2 中不难看出, 肯德可克矿区铅的地幔组分分数为 $0.03 \sim 0.18$, 地壳组分分数为 $0.82 \sim 0.97$ 。说明矿区成矿物质主要来源于地壳, 亦有少量地幔来源。

综上所述, 铅同位素各类图解均表明肯德可克矿床铅来源于上地壳与地幔的混合, 这与公式(1)计算结果一致, 故矿区铅质应主要来自含少量地幔成分的上地壳物质。这亦与黄敏等^[8] 研究结果(肯德可克矿区岩体具 I 型花岗岩特征, 为壳幔混合来源)相符, 说明矿区成矿物质铅主要来自地壳物质。

3.3 矿床成因浅析

肯德可克矿区地处祁漫塔格弧后盆地构造环境, 具有多期成矿热液叠加改造特点^[8]。矿区硫同位素数据分析表明成矿物质以岩浆来源为主, 部分来自围岩。前人研究发现矿区与成矿关系密切的花岗岩具有壳幔混合特征; 矿区铅同位素数据及其各类示踪图解均表明成矿物质来源于含少量地幔成分的上地壳物质。

根据硫、铅稳定同位素特征, 结合前人研究可推测矿床成因大致如下:

早古生代开始基底地壳拉张, 形成祁漫塔格裂陷槽, 至晚奥陶世, 矿区由上至下形成较完整的火山喷流沉积旋回^[6,8]。后期遭受热水喷流沉积作用, 致使地幔和(或)上地壳的流体沿同生断裂上升运移, 并不断萃取含矿围岩(滩间山群等)中的有用组分形成富矿质成矿流体, 在有利的成矿位置以沉积方式富集成规模较小的矿体^[3]。该区于加里东期出现弧后裂陷带, 火山岩总体表现亲弧裂谷双峰式特征, 表明深部地质事件及壳幔相互作用对矿区喷出岩的形成极为重要^[30]。海西期—印支期, 区域上发生一系列构造—岩浆活动, 表现出剧烈的壳幔相互作用及由岩石圈拆沉引起的岩浆底侵作用^[7,31]。上述地质作用深化和扩大了矿床的成矿体系, 富集了大量壳幔源成矿物质, 为矿区后期岩浆热液叠加改造活动奠定了基础。

印支期—燕山期, 强烈陆陆碰撞活动导致该区中酸性岩浆岩(二长花岗岩等)广泛发育, 且岩体具有壳幔混合的特征。岩浆热液沿有利构造裂隙向上运移, 在大气降水和(或)地下水等的影响下, 在有利的构造空间(如 EW 向断裂构造)及围岩(如滩间山群碳酸盐岩和硅质岩夹火山碎屑岩)处通过交代作

用形成夕卡岩型矿化,形成典型的夕卡岩型铁多金属矿床。这一成矿时期与前人测试所得铁矿石金矿围岩中金云母测年结果(214 Ma)及矿区与成矿关系密切的二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄 $229.5 \text{ Ma} \pm 0.5 \text{ Ma}$ 是一致的^[6-7]。

肯德可克矿区主矿体为中酸性岩浆岩(二长花岗岩为主)与滩间山群碳酸盐岩接触带附近由于含矿汽水溶液进行交代作用而形成的夕卡岩型矿体;硫、铅同位素特征分析可知矿床成矿物质是壳幔混合来源,但以壳源为主。对比祁漫塔格地区不同矿床类型的硫同位素特征显示夕卡岩型矿床的 $\delta^{34}\text{S}$ 在 $-2.1 \times 10^{-3} \sim +10.1 \times 10^{-3}$ 之间变化,刚好与矿区主成矿阶段 $\delta^{34}\text{S}$ 吻合,也从侧面反映了矿床主成矿类型为夕卡岩型。综合分析认为肯德可克矿床是成矿物质为壳幔混合来源,以夕卡岩型铁矿为主的多金属矿床。

4 结论

(1)肯德可克铁多金属矿区多种硫化物矿物的硫、铅同位素满足示踪成矿物质来源的条件,可用其相关参数探讨成矿物质来源。

(2)硫同位素特征数值表明硫主要来源于岩浆岩,部分来自围岩。

(3)铅同位素特征值及各类图解均表明成矿物质主要来源于岩浆岩,且岩体含少量地幔成分但以地壳成分为主。

(4)综合分析认为,肯德可克铁多金属矿床为壳幔混合源矿床,主矿体为中酸性岩浆岩(二长花岗岩为主)与滩间山群碳酸盐岩接触带附近的夕卡岩型矿体。

致谢:本次研究工作得到国家“十一五”科技支撑计划和中国地质调查局的资助,野外工作得到王雄军老师及莫青云师兄的帮助与指导,测试工作得到核工业北京地质研究院分析研究测试中心大力支持,在此一并表示衷心感谢。论文撰写期间张辰光、曾认宇、鞠培姣等人提供了有益的讨论,在此予以致谢。

参考文献:

[1] 潘彤, 马梅生, 康祥瑞. 东昆仑肯德可克及外围钴多金属矿找矿突破的启示[J]. 中国地质, 2001, 28(2): 17-20.

[2] 李宏录, 刘养杰, 卫岗, 等. 青海肯德可克铁、金多金属矿床地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, 27(4): 378-383.

[3] 潘彤. 青海东昆仑肯德可克钴钼金矿床硅质岩特征及成因[J]. 地质与勘探, 2008, 44(2): 51-54.

[4] 蔡岩萍, 李炯, 梁海川, 等. 青海肯德可克矿区钴多金属矿床地质特征及成因初探[J]. 黄金科学技术, 2011, 19(2): 41-46.

[5] 王力, 孙丰月, 陈国华, 等. 青海东昆仑肯德可克金-有色金属矿床矿物特征研究[J]. 世界地质, 2003, 22(1): 50-56.

[6] 伊有昌, 焦革军, 张芬英. 青海东昆仑肯德可克铁钴多金属矿床特征[J]. 地质与勘探, 2006, 42(3): 30-35.

[7] 肖烨, 丰成友, 刘建楠, 等. 青海肯德可克铁多金属矿区年代学及硫同位素特征[J]. 矿床地质, 2013, 32(1): 177-186.

[8] 黄敏, 赖健清, 马秀兰, 等. 青海省肯德可克多金属矿床地球化学特征与成因[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(9): 2659-2670.

[9] 张绍宁. 青海肯德可克铁多金属矿床特征、成因及找矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 1-91.

[10] 丁清峰. 东昆仑造山带区域成矿作用与矿产资源评价[D]. 长春: 吉林大学, 2004: 1-150.

[11] 青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-340.

[12] 丁清峰, 孙丰月, 李钟山. 青海东昆仑成矿带综合选区研究[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1101-1108.

[13] Huang Min, Lai Jian-qing, Mo Qing-yun. Fluid inclusions and metallization of the Kendekeke polymetallic deposit in Qinghai Province, China [J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2014, 88(2): 570-583.

[14] 雷源保, 赖健清, 王雄军, 等. 虎头崖多金属矿床成矿物质来源及演化[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2117-2128.

[15] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学(第一版)[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 218-234.

[16] Ohmoto H. Systematics of sulfur and carbon in hydrothermal ore deposits [J]. Economic Geology, 1972, 67: 551-578.

[17] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.

[18] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟. 地质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, 1998: 216-226.

[19] Zartman R E, Doe B R. Plumbo tectonics-the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135-162.

[20] 莫宣学, 罗照华, 邓晋福, 等. 东昆仑造山带花岗岩及地壳生长[J]. 高校地质学报, 2007, 13(3): 403-414.

[21] 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. 地球科学, 1997, 22(4): 339-342.

[22] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. Rev Miner, 1986, 16: 491-559.

[23] 丰成友, 李东生, 吴正寿, 等. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 10-17.

[24] 吴庭祥, 李宏录. 青海杂林格地区铁多金属矿床的地质特征

- 与地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28(2): 157-161.
- [25] 马圣钊, 丰成友, 李国臣, 等. 青海虎头崖铜铅锌多金属矿床硫、铅同位素组成及成因意义[J]. 地质与勘探, 2012, 48(2): 321-331.
- [26] 沈能平, 彭建堂, 袁顺达. 湖北徐家山锑矿床铅同位素组成与成矿物质来源探讨[J]. 矿物学报, 2008, 8(2): 169-176.
- [27] 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.
- [28] 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 AM Bull, 1983, 94: 43-57.
- [29] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 2002, 30(3): 73-81.
- [30] 李欢, 奚小双. 青海虎头崖—肯德可克矿区地球化学地质特征及其喷流成矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 772-783.
- [31] 奚仁刚, 校培喜, 伍跃中. 东昆仑肯德可克铁矿区二长花岗岩组成、年龄及地质意义[J]. 西北地质, 2010, 43(4): 195-202.

S and Pb isotope Characteristics of Kendekeke polymetallic deposit in Qimantage region, Qinghai province and the genetic significance

TAO Shilong^{1,2}, LAI Jianqing^{1,2}, HUANG Min^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and InfoPhysics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. School of Civil Engineering, Hunan Science and Technology University, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: Kendekeke deposit is one of the important polymetallic deposits in Qimantage region. Analysis of sulfide ore show that values of $\delta^{34}\text{S}$ range from -2.0×10^{-3} to $+5.96 \times 10^{-3}$ and averagely $+1.65 \times 10^{-3}$ coinciding with that of magma; value range of Pb isotope is small, 38.176~38.699 for $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, 15.602~15.713 for $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and 18.460~18.703 for $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$; values of $w(\text{Th})/w(\text{U})$ are from 3.55 to 3.75, which show the characteristic of stable lead isotope; μ values from 9.48 to 9.75, between the value of primitive mantle ($\mu_0=7.80$) and crust ($\mu_c=9.81$), showing the characteristic of crust-mantle mixed lead. The proportions of Pb in the crust and mantle are estimated to be 0.82~0.97 and 0.03~0.18 respectively. It is speculated that crust Pb is dominant and a little from mantle magma, i. e. crust-mantle mixed Pb. According to the geological characteristics and the previous data we consider Kendekeke deposit a skarn-dominated polymetallic deposit.

Key Words: Kendekeke, Qimantage; S isotope characteristics; Pb isotope characteristics; ore material source; Qimantage region; Qinghai province