

## 青海省肯德可克多金属矿床地球化学特征与成因

黄 敏<sup>1,2</sup>, 赖健清<sup>1,2</sup>, 马秀兰<sup>3</sup>, 曹德云<sup>4</sup>

- (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. 青海省第四地质矿产勘查院, 西宁 810029;
4. 青海省环境地质勘查局, 西宁 810007)

**摘要:** 青海省肯德可克多金属矿床位于祁漫塔格成矿带, 矿床产出的大地构造背景为柴达木南缘弧后裂陷构造带中的火山盆地。结合矿床地质成矿条件, 通过现场调查, 对矿区典型的岩浆岩、围岩及矿石进行了化学全分析、稀土和微量元素分析及铅同位素分析, 总结了矿床地球化学特征, 查明物质来源, 探讨矿床成岩、成矿机制。结果表明: 矿区岩体富钠, 为钙碱性岩, 来源于深部, 后期发生混染, 为壳幔混合来源。围岩稀土元素分析表明: 成岩过程有海水参与, 矿床具热水喷流沉积特征。各类矿石铅同位素的  $\mu$  值介于 9.45~9.75 之间, 具有深源铅和壳源铅特征。铅同位素特征参数示踪、铅构造模式示踪和  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  图解示踪的结果表明: 铅来源受岩浆作用影响, 主要为壳幔混合铅。岩浆岩、围岩及矿体地球化学特征表明: 肯德可克多金属矿床形成过程受海水影响, 具热水喷流沉积特征, 成岩成矿物质来源深部, 受多源混染影响; 矿床演化史漫长, 从早期热水喷流沉积到的晚古生代的构造—岩浆活动, 深化及扩大了成矿体系, 晚期热液活动又对矿床进行了叠加改造, 具多因复成特征。

**关键词:** 地球化学; 成矿作用; 铅同位素; 肯德可克; 祁漫塔格

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

## Geochemical characteristics and genesis of Kendekeke deposit in Qinghai Province, China

HUANG Min<sup>1,2</sup>, LAI Jian-qing<sup>1,2</sup>, MA Xiu-lan<sup>3</sup>, CAO De-yun<sup>4</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogenesis Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Fourth Institute of Qinghai Geological Mineral Prospecting, Xining 810029, China;
4. Environmental Geological Exploration Bureau of Qinghai Province, Xining 810007, China)

**Abstract:** Kendekeke polymetallic deposit is located in Qimantage ore belt of Qinghai Province and the background of this deposit is a volcanic basin in the back-arc rift tectonic zone of southern margin of Qaidam. Combined with field investigation and ore-forming geological conditions, the geochemical characteristics of deposit were summarized, the origin of the ore-forming materials was ascertained, the rock-forming mechanism and ore-forming mechanism of the deposit were discussed according to the study of lead isotope as well as chemical analysis, including whole-rock analysis, REE analysis and trace elements analysis. Typical magmatic rocks, wall rocks and ores were used as the research objects. The results show that magmatic rocks belong to calc-alkaline series, rich in sodium and derived from the source of crust-mantle mixed deep in the earth. The REE studies of wall rocks indicate the seawater involved in diagenesis and the deposit with characteristics of exhalative sedimentary deposit. The lead isotope research illustrates the

基金项目: 中国地质调查局项目(资[2008]青藏 21-03); 国家地质调查局项目(资[2011]03-01-64)

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-06-30

通信作者: 赖健清, 教授, 博士; 电话: 0731-88879330; E-mail: ljq@csu.edu.cn

$\mu$  values of minerals range from 9.45 to 9.75, which are characterized by both deep-sourced and crust-sourced origins. Based on the tracer analysis regarding the characteristic parameters, lead composition model and  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  diagram, the results show that the ore lead mainly is crust-mantle mixed lead and affected by magmatism during the enrichment process. The geochemical properties of magmatic rocks, wall rocks and ore reveal that Kendekeke deposit was affected by seawater in the formation progress and has the properties of exhalative sedimentary deposit. The diagenetic materials and ore-forming material, which were affected by the mixing of multi-source, came from the deep of the earth. The deposit had a long evolution history, begun from the early exhalative sedimentation to Late Paleozoic tectonic-magmatic activities, deepened and expanded the mineralization system, and the late hydrothermal activities superimposed and reformed the deposit, which is a polygenetic compound deposit.

**Key words:** geochemistry; metallogenesis; lead isotope; Kendekeke; Qimantage

青海肯德可克多金属矿位于东昆仑西段的祁漫塔格山脉与柴达木盆地的接壤地带，柴达木盆地的西南缘——塔柴板块的祁漫塔格弧后裂陷构造带中部的加里东期火山盆地，属东昆仑成矿带，是一个以铁、金矿为主并伴生钴、铋、银、铅、锌、铜等多金属综合型矿床<sup>[1]</sup>。祁漫塔格地区经历了加里东、印支、燕山期等多次构造运动，是东昆仑成矿带中的重要矿集区，找矿潜力巨大。肯德可克矿床在该区发现较早，前人研究认为其具热水喷流成矿特征，并受后期改造，成矿作用及规律十分复杂，但成岩机制及成矿物质来源等问题一直存在争议<sup>[2-4]</sup>。本文作者在已有工作基础上，对矿区岩浆岩、地层和矿体等不同地质体进行同位素和稀土元素地球化学研究，旨在查明成岩成矿物质来源，探讨矿床形成演化规律，为矿床成因与矿床模型的建立提供进一步可靠依据。

## 1 地质背景

研究区位于古亚洲构造域与特提斯构造域结合部位的东昆仑成矿带的西段<sup>[5]</sup>。东昆仑主要经历了元古宙古陆裂解和大洋玄武岩高原形成、加里东期前原特提斯洋盆闭合、俯冲碰撞、边缘增生、晚华力西-印支期缝合造山、印支晚期-燕山期岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵作用、中新生代东昆仑东西构造分化等阶段<sup>[6]</sup>。加里东期到海西-印支期，是祁漫塔格地区地质构造演化最重要时期，印支期转入陆内演化阶段，伴随巴颜喀拉洋(古特提斯洋)封闭及强烈的壳-幔相互作用、岩石圈拆沉和地幔岩浆底侵作用，构造体制从挤压向伸展转化，大量幔源物质、能量参与构造岩浆活动和成矿，使印支期成为祁漫塔格地区最重要的热液矿床形成期<sup>[7]</sup>。

区域地层以前寒武系、下古生界奥陶-志留系、

上古生界石炭-二叠系、中生界三叠系为主<sup>[8-9]</sup>。矿区地层有奥陶-志留系滩间山群下岩组(O-ST<sub>1</sub>)碳酸盐岩和硅质岩夹火山碎屑岩，泥盆系耗牛山组(D<sub>3</sub>m)中酸性火山碎屑岩、熔岩、角砾岩，石炭系大干沟组(Cdg)和缔敖苏组(Cd)的碳酸盐岩类夹砂岩和砂质泥岩，以及第四系坡积物(Q)(图1)。

矿区基底构造为一近东西向单斜构造，矿区中南部发育一轴向近东西的挤压紧闭型向斜。断裂构造按走向分为东西向、北东向和北北西向三组。东西向断裂形成较早，规模较大，破碎带较宽，具时剪时张特征，长期处于活动状态，为矿质活化提取、运移沉淀和富集提供了条件。矿体多赋存于该组断层中，是区内最主要的控矿构造。北东向和北北西向断裂形成较晚，对部分矿体起破坏作用<sup>[10]</sup>。

区域上岩浆成带出现，以中酸性岩为主，明显受北西向和北东向断裂控制。矿区岩浆活动主要表现为侵入活动，地表仅出露少量闪长岩和石英正长斑岩，规模较小。在钻孔及坑道内可见酸性岩、中酸性岩，以花岗岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等为代表。此外，还发育有闪长玢岩和二长闪长角砾熔岩。

矿体赋存在滩间山群浅变质火山沉积建造中，以层状、似层状、透镜状为主，少量呈脉状矿体。矿体产状与地层产状类似，走向近东西，以磁铁矿体为主，伴生铜多金属矿体。主要矿石矿物为磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿，其次有少量方铅矿、闪锌矿、辉铋矿、方钴矿和辉钼矿，脉石矿物为方解石、石英、绿泥石、白云母等。矿石结构以他形粒状、自形粒状、交代等结构为主，矿石构造有脉状、团块状、条带(条纹)状构造等。矿床围岩蚀变种类多样，以矽卡岩化、碳酸盐化和硅化最强烈。与铁、锌和钼矿化密切的为矽卡岩化和碳酸盐化，与金矿化密切的为硅化和绢云母化。

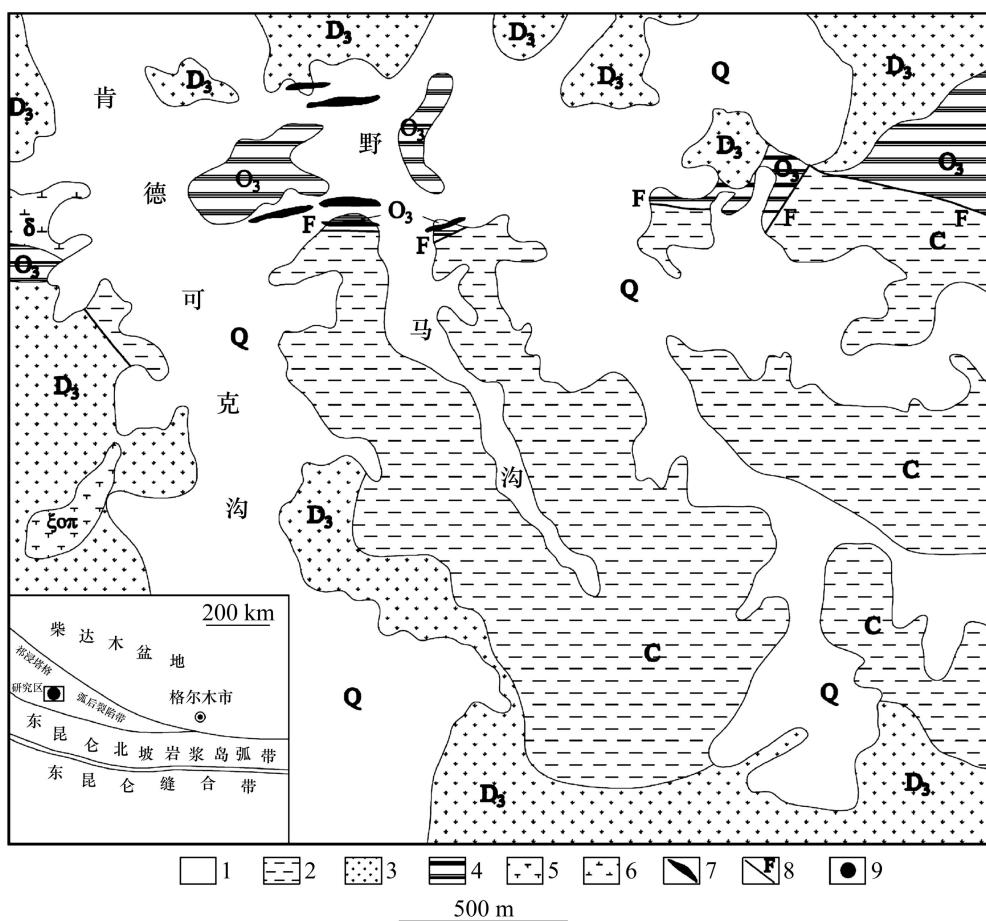


图 1 肯德可克矿区地质简图<sup>[10]</sup>: 1—第四系; 2—石炭系; 3—上泥盆统牦牛山组; 4—奥陶-志留系滩间山群; 5—石英正长斑岩; 6—闪长岩; 7—矿体; 8—断层; 9—矿区

**Fig. 1** Geological sketch map of Kendekek deposit<sup>[10]</sup>: 1—Quaternary; 2—Carboniferous; 3—Upper Devonian Maoniushan formation; 4—Ordovician-Silurian Tanjianshan group; 5—Quartz-syenite porphyry; 6—Diorite; 7—Ore body; 8—Fault; 9—Studied area

## 2 矿床地球化学

### 2.1 岩体地球化学特征

本次研究样品采自肯德可克地区, 岩性以侵入岩为主, 火山岩次之, 还有少量浅成岩脉。火山岩形成于为海西期, 侵入岩主要为印支-燕山期。岩性上火山岩为泥盆系的角砾熔岩, 侵入岩主要以花岗闪长岩、闪长岩、花岗岩为主, 呈岩株侵入于滩间山群碳酸盐岩夹硅质岩、泥盆系火山岩和石炭系结晶灰岩中<sup>[10]</sup>。印支-燕山期岩浆作用制约着肯德可克矿床后期叠加改造造成矿作用。

#### 2.1.1 主量元素特征

主量元素分析是研究岩浆岩最重要的方法之一, 对于岩浆岩的精确鉴定、对比, 分析其联系、成因、演化等, 都非常重要。本次分析工作由中国广州澳实

矿物研究室采用 X 荧光光谱分析法(ME-XRF06)完成, 各项检测出限均为 0.01%, 结果见表 1。并将数据投影制图(见图 2 和 3), 分析岩浆岩的地球化学特征。化学成分分析结果显示样品的  $\text{SiO}_2$  含量在 57.77%~72.1% 之间, 平均含量为 63.9%, 略高于中国同类岩石的  $\text{SiO}_2$  平均含量 57.39%(黎彤值 1976, 下同), 大体属于硅酸弱饱和类岩石。其中样品 KPB-21 为过饱和岩石。

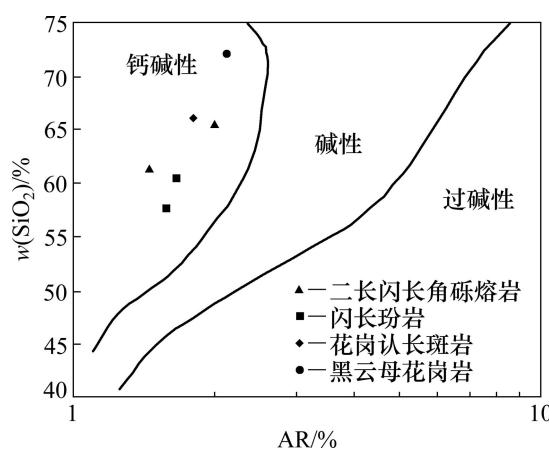
侵入岩样品碱总量( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ )为 4.75%~6.00%, 平均值为 5.42%;  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值在 1.06~2.74 之间, 平均值为 1.54, 为钠质岩石。 $\text{K}_2\text{O}/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  值在 0.27~0.67 之间, 平均为 0.42。与中国同类岩石相比, 岩石碱总量偏高, 具明显富硅富钠富碱特征;  $\text{A/CNK} > 1.1$ , 里特曼组合指数( $\sigma$ )值在 1.24~1.64 之间, 小于 1.8, 属钙碱性岩。熔岩碱总量处于 4.42%~6.98% 间, 样品 KW-30 的  $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  值为

表1 肯德可克地区岩浆岩全岩分析结果统计表

Table 1 Chemical composition of magmatic rocks in Kendekeke deposit

样品	Mass fraction/%						中国花岗	
	KW-29	KW-30	KW-33	KPB-10	KPB-11	KPB-21	平均值	闪长岩 平均值
岩石 类型	二长闪长角 砾熔岩	二长闪长角 砾熔岩	闪长玢岩	花岗闪长 斑岩	闪长玢岩	黑云母 花岗岩		
SiO <sub>2</sub>	65.56	61.50	60.56	66.11	57.77	72.10	63.90	57.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.87	18.39	16.54	17.15	17.39	14.47	17.67	16.42
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.25	5.68	7.70	2.87	6.40	2.83	4.98	3.10
CaO	2.03	5.07	2.61	3.41	4.75	2.20	3.57	5.58
MgO	0.65	0.96	2.26	0.56	3.52	0.68	1.59	3.77
Na <sub>2</sub> O	2.30	2.98	3.48	3.09	2.88	2.92	3.09	4.26
K <sub>2</sub> O	4.68	1.44	1.27	2.91	2.04	3.08	2.32	2.57
MnO	0.06	0.16	0.10	0.13	0.17	0.11	0.01	0.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.15	0.17	0.07	0.15	0.09	0.64	0.37
TiO <sub>2</sub>	0.35	0.82	0.76	0.43	0.86	0.26	0.12	0.89
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.13	
SrO	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	
BaO	0.10	0.04	0.04	0.07	0.03	0.06	0.06	
LOI	2.73	2.50	4.20	2.30	3.92	0.98	3.13	
Total	99.68	99.73	99.72	99.14	99.92	99.82	99.64	
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	6.98	4.42	4.75	6.00	4.92	6.00	5.42	
K <sub>2</sub> O/(K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O)	0.67	0.33	0.27	0.49	0.41	0.51	0.42	
A/CKN	2.09	1.94	2.25	1.82	1.80	1.76	1.98	
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.49	2.07	2.74	1.06	1.41	0.95	1.54	
$\sigma$	2.16	1.06	1.28	1.56	1.64	1.24	1.54	

测试单位: 广州澳实矿物实验室; A/CKN=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(CaO+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O); 黎彤值, 1976。

图2 岩浆岩AR—SiO<sub>2</sub>图: AR=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]/[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]Fig. 2 AR—SiO<sub>2</sub> diagram for magmatic rocks: AR=[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]/[Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO-(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)]

2.07, 为钠质岩石; KW-29 的 Na<sub>2</sub>O<K<sub>2</sub>O, 为钾质岩石。由于 A/CKN>1.1, 里特曼组合指数( $\sigma$ )均小于4, 上述岩石属广义上的钙碱性岩。

样品在  $w(\text{SiO}_2)$  碱度指数与图解上(见图2)均处于钙碱性岩区。在 Na<sub>2</sub>O—K<sub>2</sub>O 图解中(见图3(a)), 侵入岩集中落在 I型花岗岩范围内, 表明区内侵入岩为 I型, 即成壳幔混合型。据 HART 等<sup>[11]</sup>的研究, 在 Ce/Yb—Eu/Yb 图上如果样品点有明显的线性关系, 则表明岩体在形成过程以混合作用为主。对照本区 Ce/Yb—Eu/Yb 图解(图3(b))可知, 样品间具有明显线性分布特征, 说明岩体的形成过程发生了混合作用, 应为壳幔混合型成因。

### 2.1.2 稀土元素特征

稀土元素地球化学研究在示踪成矿物质来源、成矿条件及成矿过程等方面起重要的作用, 在矿床成因

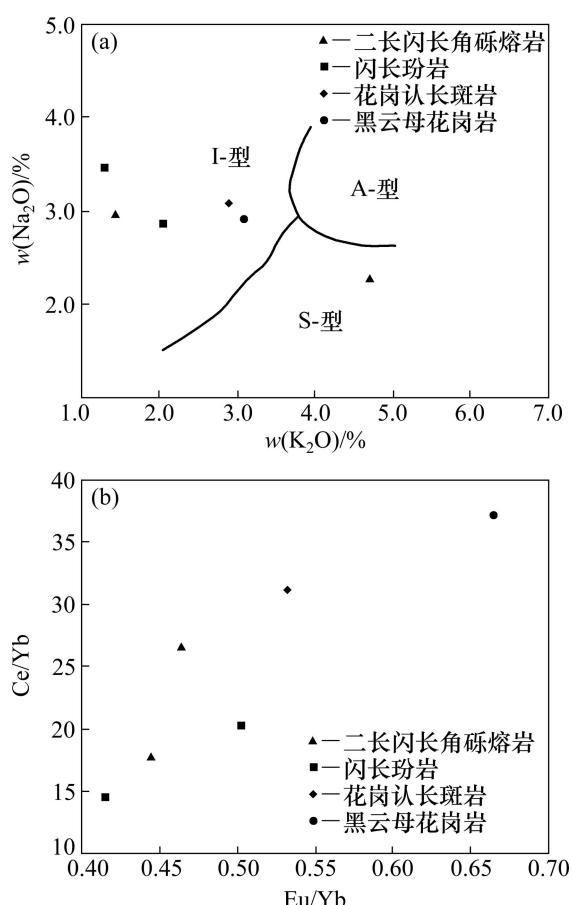


图 3 肯德可克岩浆岩化学图解<sup>[11]</sup>: (a)  $w(\text{Na}_2\text{O})$ — $w(\text{K}_2\text{O})$  图; (b) Ce/Yb—Eu/Yb 图

**Fig. 3** Geochemical diagrams of magmatic rocks in Kendekeke<sup>[11]</sup>: (a)  $w(\text{Na}_2\text{O})$ — $w(\text{K}_2\text{O})$  diagram; (b) Ce/Yb—Eu/Yb diagram

中得到广泛应用。本次稀土元素由中国广州澳实矿物研究室采用质谱仪定量分析法(ME-MS81)完成, 大部分元素检测限小于 $1 \times 10^{-6}$ , 稀土元素标准化采用1971年赫尔曼球粒陨石标准值(下同)。岩体稀土元素含量及特征值见表2, 配分图(见图4)显示曲线变化趋势一致, 均向右倾, 轻稀土较陡, 重稀土较平缓, 属轻稀土富集型。稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )在 $85.78 \times 10^{-6}$ ~ $154.97 \times 10^{-6}$ 之间, 平均值 $119.73 \times 10^{-6}$ , 低于世界花岗质岩石稀土元素平均含量( $292 \times 10^{-6}$ )。轻稀土总量(LREE)变化范围为 $70.56 \times 10^{-6}$ ~ $141.46 \times 10^{-6}$ , 重稀土总量(HREE)变化范围为 $10.91 \times 10^{-6}$ ~ $16.93 \times 10^{-6}$ , 轻重稀土比(LREE/HREE)介于4.93~11.49之间, 轻重稀土比远大于1, 轻稀土相对富集强烈。铕异常( $\delta\text{Eu}$ )值介于0.72~0.79, 小于陨石值, 属铕弱负异常型, 镨异常( $\delta\text{Ce}$ )值介于0.89~0.97, 镨属弱负异常型, 岩浆分离作用不明显。 $\text{Sm}/\text{Nd} > 0.3$ , 表明岩体具幔源特征<sup>[12]</sup>。

### 2.1.3 微量元素特征

微量元素研究是良好的化学指示剂, 被广泛运用于成岩过程判断、源区示踪等方面。本次研究的测试单位和方法跟主量元素分析相同。由岩体微量元素含量表(见表3)可知, 矿区岩体中W、Mo、Ag含量平均值分别为 $3.5 \times 10^{-6}$ 、 $2.0 \times 10^{-6}$ 、 $1.0 \times 10^{-6}$ , 均高于维氏值, 较富集。V、Cr、Co、Ni、Ba、Sr的含量相差不大, 属于同一数量级。其中具指示岩体分离结晶作用强烈程度的元素: Sr和Ba的含量范围分别是 $(215.0\sim 508.0) \times 10^{-6}$ 和 $(235.0\sim 756.0) \times 10^{-6}$ , 变化较大, 表现为部分富集, 部分亏损。李昌年<sup>[13]</sup>认为非造山型花岗岩由于岩石形成于长期较稳定的环境, 有强烈分离结晶作用存在, 表现为Sr和Ba的强烈亏损。据肯德可克岩体中Sr和Ba元素含量特点可知, 岩体既具非造山型花岗岩特征又有造山型花岗岩特征, 说明原始岩浆来源于深部, 后期运移至浅部发生了混染。该结论与 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解与Ce/Yb—Eu/Yb图解吻合, 即岩体具I型花岗岩特征, 为壳幔混合来源。

## 2.2 围岩与矿体地球化学特征

矿区围岩以碳酸盐岩、硅质岩、砂岩及砂质泥岩为主, 其中奥陶—志留系滩间山群碳酸盐岩与硅质岩夹火山碎屑岩具矿源层特征<sup>[6]</sup>。地球化学研究对查明围岩的成岩环境及过程具有重要意义。在矿体地球化学研究中, 本文作者尝试利用磁铁矿单矿物的稀土元素和矿石铅同位素综合研究矿床成矿物质的来源、成矿的物理化学环境。

### 2.2.1 稀土元素特征

从稀土元素含量及特征值表(见表4)可知, 围岩稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )介于 $113.10 \times 10^{-6}$ ~ $156.96 \times 10^{-6}$ , 均值为 $133.75 \times 10^{-6}$ , 低于同类岩石。轻重稀土比(LREE/HREE)介于4.37~10.38, 均值7.39, 轻重稀土比远大于1, 轻稀土富集强烈。经赫尔曼球粒陨石值标准化后作出稀土配分模式图(见图5), 图5显示配分曲线均为右倾,  $\delta\text{Eu}$ 值为0.33~0.74, 变化较大, 为Eu负异常, 有明显铕谷, 镨异常( $\delta\text{Ce}$ )值为0.8~0.97, 为弱的负异常, 可见铕谷, 其特征与海水相似, 但Ce、Eu负异常不同于海水, 与热水沉积物金属物相似, 说明成岩过程有海水参与具热水喷流沉积特征。前人研究矿区围岩认为: 热水沉积物热水源中混入了向下渗透而后上升的海水, 因此热水沉积物能够保留海水固有的 $\Sigma\text{REE}$ 低, Ce亏损等特点<sup>[14]</sup>。

矿体稀土元素研究对象为磁铁矿单矿物, 磁铁矿样品采自矿区磁铁矿矿体, 室内挑选磁铁矿单矿物, 控制纯度在99%以上, 后将样品进行质谱仪定量

表2 肯德可克地区岩体稀土元素含量及特征值表

Table 2 REE contents and eigenvalues of magmatic rocks in Kendekeke deposit

样品	Mass fraction/ $10^{-6}$						平均值
	KW-29	KW-30	KW-33	KPB-10	KPB-11	KPB-21	
岩性描述	二长闪长 角砾熔岩	二长闪长 角砾熔岩	闪长 玢岩	花岗闪 长斑岩	闪长 玢岩	黑云母 花岗岩	
La	80.59	69.12	53.82	83.53	49.12	99.71	72.65
Ce	58.57	52.97	47.03	60.00	35.16	74.62	54.73
Pr	47.44	47.11	43.06	48.35	29.92	61.82	46.28
Nd	31.41	35.16	33.28	32.50	22.66	42.50	32.92
Sm	19.38	24.51	23.13	19.79	19.18	25.54	21.92
Eu	12.19	16.16	14.38	12.74	12.33	16.44	14.04
Gd	12.88	17.65	14.92	12.69	15.08	16.08	14.88
Tb	10.85	16.17	13.40	10.43	14.26	12.55	12.94
Dy	9.40	14.77	11.57	8.83	12.83	9.53	11.16
Ho	7.31	11.79	8.97	6.92	9.74	7.18	8.65
Er	9.25	13.75	10.55	8.35	11.25	8.65	10.30
Tm	8.44	12.19	10.00	7.50	10.00	7.81	9.32
Yb	8.82	12.14	9.45	7.91	10.00	8.32	9.44
Lu	8.82	12.35	9.71	8.24	10.29	9.12	9.75
Y	8.65	13.45	10.00	8.40	12.25	8.70	10.24
LREE	110.32	104.68	92.12	113.51	70.56	141.46	105.44
HREE	11.61	16.93	13.52	10.91	14.32	12.31	13.27
$\Sigma$ REE	122.82	122.79	106.69	125.35	85.78	154.97	119.73
LREE/HREE	9.50	6.18	6.81	10.40	4.93	11.49	8.22
$\delta$ Eu	0.76	0.77	0.76	0.78	0.72	0.79	0.76
$\delta$ Ce	0.91	0.91	0.97	0.91	0.89	0.92	0.92
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	6.64	4.36	4.97	7.59	3.52	8.97	6.01
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.14	5.70	5.69	10.56	4.91	11.99	8.00
(La/Sm) <sub>N</sub>	4.16	2.82	2.33	4.22	2.56	3.90	3.33
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.46	1.45	1.58	1.60	1.51	1.93	1.59
Ce/Yb	27.47	18.05	20.58	31.38	14.55	37.10	24.86
Eu/Yb	0.46	0.44	0.50	0.53	0.41	0.66	0.50
La/Sm	7.25	4.92	4.06	7.36	4.47	6.81	5.81
La/Yb	14.12	8.80	8.80	16.32	7.59	18.52	12.36

测试单位：中国广州澳实矿物实验室；标准化：样品稀土元素实测含量/球粒陨石平均含量。

表3 肯德可克矿区岩体微量元素含量

Table 3 Trace elements contents of magmatic rocks in Kendekeke deposit

样品	Mass fraction/ $10^{-6}$						平均值	维氏值 (1962)
	KW-29	KW-30	KW-33	KW-34	KPB-10	KPB-11		
岩性	二长闪长	二长闪长	闪长	花岗闪	闪长	黑云母		
描述	角砾熔岩	角砾熔岩	玢岩	长斑岩	玢岩	花岗岩		
W	3.0	3.0	3.0	5.0	3.0	4.0	3.5	1.3
Sn	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	5.0	2.8	25.0
Mo	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.1
Cu	9.0	6.0	22.0	5.0	25.0	9.0	12.8	47.0
Pb	14.0	13.0	11.0	9.0	17.0	14.0	13.0	15.0
Zn	21.0	60.0	73.0	45.0	22.0	59.0	46.7	83.0
Ag	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.1
V	39.0	100.0	104.0	74.0	34.0	123.0	79.0	90.0
Cr	10.0	20.0	20.0	20.0	30.0	30.0	21.7	83.0
Co	1.7	12.6	16.3	5.8	5.5	11.0	8.8	18.0
Ni	5.0	5.0	9.0	5.0	7.0	11.0	7.0	58.0
Ba	756.0	361.0	341.0	639.0	586.0	235.0	486.3	650.0
Sr	215.0	315.0	249.0	508.0	327.0	333.0	324.5	340.0

测试单位: 中国广州澳实矿物实验室。

分析, 获得磁铁矿单矿物稀土元素含量值见表 4。由表可知, 稀土总量( $\Sigma$ REE)在  $22.66 \times 10^{-6} \sim 45.69 \times 10^{-6}$  之间, 均值为  $34.14 \times 10^{-6}$ ; 轻重稀土比(LREE /HREE)介于 1.97~2.90, 均值为 2.31, 轻重稀土比大于 1, 轻稀土强烈富集, 且轻稀土的分馏程度比重稀土高。经赫尔曼球粒陨石值标准化后作稀土配分模式图(见图 6), 图 6 中显示所有样品的配分曲线均右倾, 铕异常

( $\delta$ Eu)值变化大, 介于 0.59~1.11 间, 样品 KM-4 为 1.11, 为铕弱正异常型, 其余属铕弱负异常型。铈异常( $\delta$ Ce)值变化范围为 0.68~0.74, 均值为 0.70, 数值变化小, 属铈弱负异常型。变化的铕异常表明磁铁矿成矿环境不稳定, 物理化学条件如氧逸度发生了明显变化。

综合三类地质体的稀土元素平均值, 绘制稀土配分曲线模式图(见图 7)。由图 7 可知, 三类地质体的稀

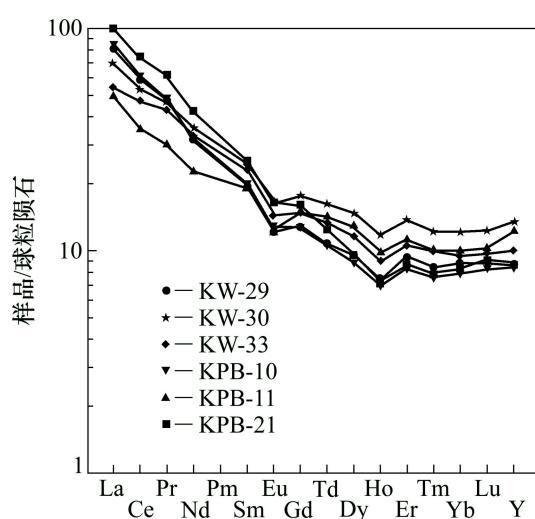


图4 肯德可克地区岩体稀土元素配分图

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of magmatic rocks in Kendekeke

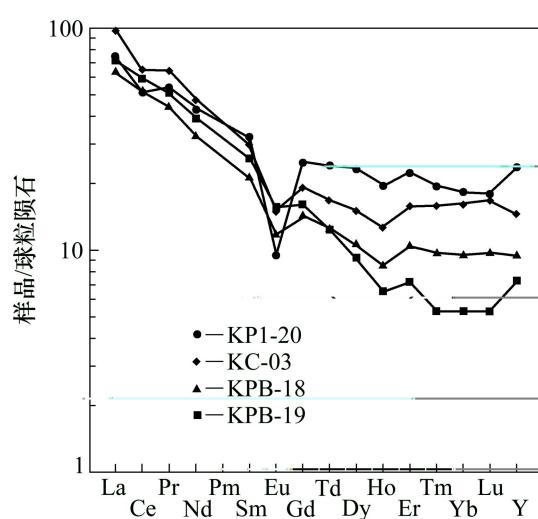


图5 肯德可克地区围岩稀土元素配分模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of wall rock in Kendekeke

表4 肯德可克矿区围岩及矿石磁铁矿稀土元素含量及特征值

Table 4 REE contents and eigenvalues of wall rocks and magnetite of ores in Kendekeke deposit

样品号	Mass fraction/ $10^{-6}$								围岩 平均值
	KD-05	KD-07	KM-4	磁铁矿 平均值	KP1-20	KC-03	KPB-18	KPB-19	
描述	磁铁矿	磁铁矿	磁铁矿	石英岩	硅质岩	含细砂泥岩	长石石英砂岩		
La	26.25	29.38	15.31	23.65	73.82	98.53	63.53	71.18	76.76
Ce	12.13	15.00	7.02	11.38	51.43	64.95	52.20	58.90	56.87
Pr	9.33	11.25	5.33	8.64	53.72	64.38	44.21	51.07	53.35
Nd	6.00	7.67	3.83	5.83	43.13	47.66	32.34	39.22	40.59
Sm	3.35	5.35	2.20	3.63	32.15	30.05	21.28	25.95	27.36
Eu	2.19	2.88	2.19	2.42	9.45	14.93	11.64	15.62	12.91
Gd	2.77	4.39	1.74	2.97	24.65	19.27	14.31	16.04	18.57
Tb	2.40	4.20	2.00	2.87	24.04	16.81	12.55	12.34	16.44
Dy	2.39	4.61	2.19	3.06	23.13	15.13	10.60	9.27	14.53
Ho	2.05	4.11	2.33	2.83	19.49	12.69	8.46	6.54	11.79
Er	2.52	4.24	2.43	3.06	22.25	15.80	10.40	7.20	13.91
Tm	1.82	3.03	2.12	2.32	19.38	15.94	9.69	5.31	12.58
Yb	2.63	4.05	2.53	3.07	18.27	16.14	9.45	5.32	12.30
Lu	2.26	3.23	2.26	2.58	17.94	16.76	9.71	5.29	12.43
Y	2.91	5.00	2.55	3.49	23.60	14.50	9.40	7.30	13.70
LREE	25.35	30.73	15.04	23.71	112.27	136.75	99.30	114.14	115.62
HREE	8.73	14.96	7.62	10.44	25.70	19.12	12.95	11.00	17.19
$\Sigma$ REE	34.08	45.69	22.66	34.14	138.66	156.96	113.10	126.28	133.75
LREE/HREE	2.90	2.05	1.97	2.31	4.37	7.15	7.67	10.38	7.39
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.98	7.25	6.06	7.76	4.04	6.11	6.72	13.38	7.56
(La/Sm) <sub>N</sub>	7.84	5.49	6.96	6.76	3.40	2.01	1.83	1.66	2.23
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	4.61	3.70	2.78	3.70	2.81	4.02	5.52	11.08	5.86
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.05	1.08	0.69	0.94	1.35	1.19	1.51	3.02	1.77
Eu/Yb	0.32	0.27	0.33	0.31	0.17	0.31	0.41	0.97	0.47
Ce/Yb	22.80	18.31	13.75	18.29	11.64	16.65	22.84	45.81	24.23
La/Sm	12.54	8.79	11.14	10.82	4.00	5.72	5.20	4.78	4.93
La/Yb	16.80	12.21	10.21	13.07	6.24	9.44	10.38	20.68	11.69
$\delta$ Eu	0.72	0.59	1.11	0.81	0.33	0.61	0.65	0.74	0.58
$\delta$ Ce	0.68	0.74	0.68	0.70	0.81	0.80	0.97	0.96	0.88

测试单位：中国广州澳实矿物实验室标准化值：样品稀土元素实测含量/球粒陨石平均含量。

上配分模式相似，均右倾，轻稀土富集，具明显铕负异常和弱铈负异常，表明成岩成矿物质具有一定的同源性和继承性。肯德可克矿床3种地质体均保留了海水低ΣREE、铈亏损等特点，具有海底热水喷流沉积的特点。

## 2.2.2 铅同位素特征

同位素测试由武汉地质矿产研究所(宜昌同位素测试中心)完成，铅同位素测试利用MAT261质谱仪，同位素比值用NBS2981标准样进行矫正，分析总体误差小于0.05%。表5所示为肯德可克矿区铅同位素数

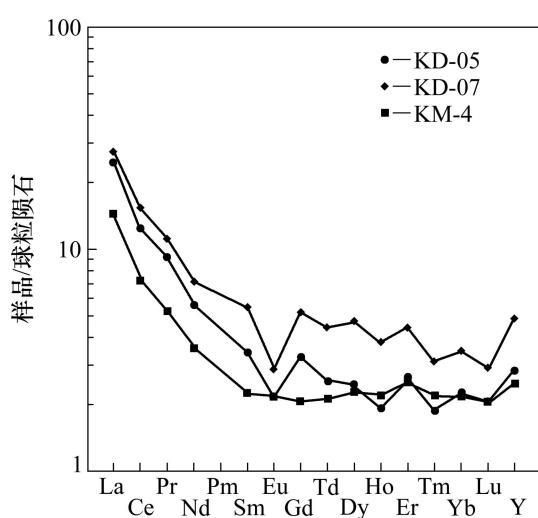


图6 磁铁矿稀土元素配分模式图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of magnetite

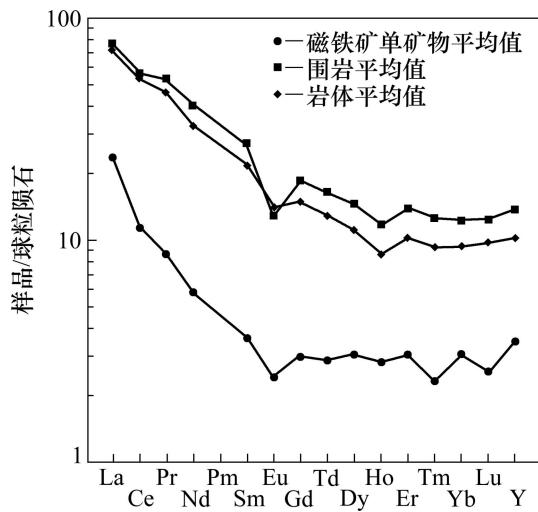


图7 肯德可克矿区稀土元素综合配分模式图

Fig. 7 Synthetic chondrite-normalized REE patterns of Kendekeke deposit

表5 肯德可克矿区铅同位素组成及相关参数

Table 5 Lead isotopic characteristic parameters of ores in Kendekeke deposit

样品号	矿物名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	表面年龄/Ma	$\mu$	Th/U	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
KD02	方铅矿	18.560	15.602	38.176	59.6	9.45	3.55	73.91	17.73	21.36
KD04-1	黄铁矿	18.703	15.761	38.687	155.0	9.75	3.72	89.59	28.49	39.19
KD05	黄铁矿	18.615	15.645	38.296	74.2	9.53	3.58	78.21	20.59	25.20
KD05	磁铁矿	18.617	15.643	38.347	70.2	9.53	3.60	78.02	20.44	26.39
KD06	黄铁矿	18.576	15.618	38.271	68.4	9.48	3.59	75.51	18.80	24.28
KD07	磁铁矿	18.594	15.625	38.237	64.1	9.49	3.56	76.22	19.24	23.19
KM-4	磁铁矿	18.464	15.654	38.361	63.0	9.56	3.59	68.62	21.13	26.46
KM-5	方铅矿	18.621	15.657	38.328	85.1	9.55	3.59	79.39	21.42	26.52

测试单位: 国土资源部宜昌地质矿产研究所同位素实验室

据。由表5可知:  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值范围为 18.464~18.703, 均值为 18.594, 极差为 0.239;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值范围为 15.602~15.761, 均值为 15.651, 极差为 0.159; 而  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值范围为 38.176~38.687, 均值为 38.338, 极差 0.511。

根据单阶段铅演化模式, 利用 Geokit 软件<sup>[15]</sup>计算出铅同位素各特征参数(见表 5)。Th/U 值范围为 3.55~3.72, 平均值为 3.60。矿石  $\mu$  值介于 9.45~9.75 之间, 平均值为 9.541。其中有 1 个超过 9.58 的高值为 9.75, 其他均低于 9.58, 这一范围介于地壳  $\mu_C=9.81$  与原始地幔  $\mu_0=7.80$  之间, 反应出壳幔混合铅特征。

一般来说具高  $\mu$  值( $\mu>9.58$ )的铅为高放射性壳源铅,  $\mu<9.58$  的铅为低放射性深源铅<sup>[16]</sup>。本矿床铅同位素的  $\mu$  值介于 9.45~9.75 之间, 均值为 9.54, 有 1 个大于 9.58 的高值为 9.75, 其余低于 9.58, 说明本区铅同位素同时具有深源铅和壳源铅特征。Th/U 值为 3.55~3.72, 均值为 3.60, 数据位于中国大陆上地壳平均值 3.47 和全球上地壳平均值 3.88 之间<sup>[17~18]</sup>, 表明矿物形成于上地壳。在铅同位素组成 Zartman-Doe 图解(见图 8)中, 样品均落在上地壳和造山带铅演化线之间, 集中于造山带铅演化线上, 主要为造山带铅与上地壳铅的混合产物。综合分析认为, 肯德可克矿石铅可能来源于与造山作用有关的壳幔物质混合。

前人研究表明, 最能反映源区变化的是  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  和  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  的变化, 而  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  只对成矿时代有所反映。用  $\Delta\beta$  和  $\Delta\gamma$  作成因示踪, 能提供更多更丰富的地质过程与物质来源信息<sup>[19]</sup>。为更进一步探讨本区矿石铅来源, 计算出矿物与同时代地幔的相对偏差值  $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$  和  $\Delta\gamma$ (见表 5), 进行铅同位素成因  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  分类图解(见图 9)分析。图 9 中投影点均位于与岩浆作用有关的壳幔混合俯冲铅源区, 表明矿石铅应来自与造山作用有关的壳幔物质混合。此外, 在铅同位素构造环

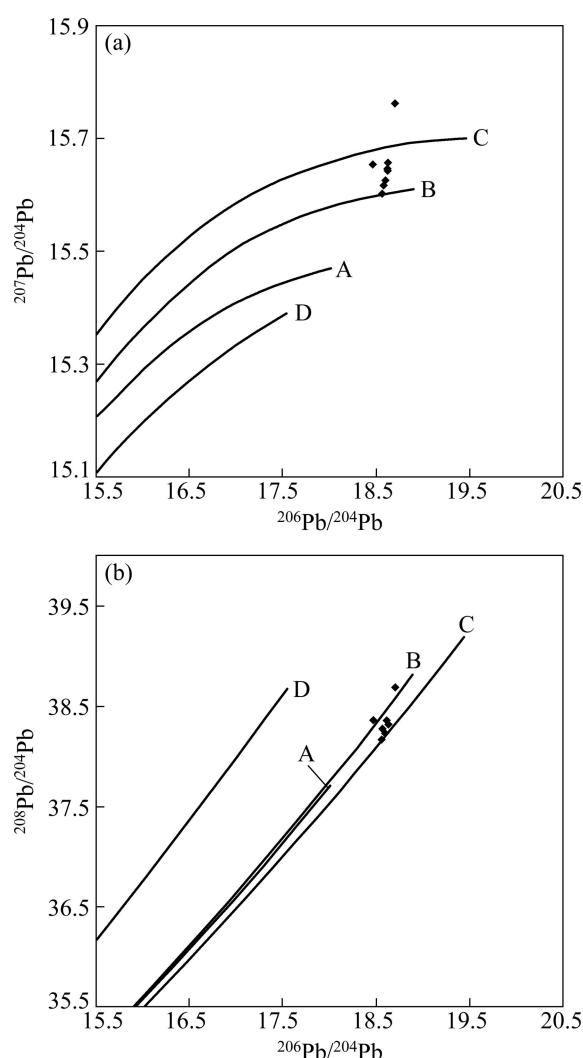


图8 铅同位素组成图解<sup>[18]</sup>: A—地幔; B—造山带; C—上地壳; D—下地壳

**Fig. 8** Diagrams of lead isotope compositions<sup>[18]</sup>: (a)  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ; (b)  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ; A—Mantle; B—Orogenic belt; C—Upper crust; D—Lower crust

境判别图解中(见图10),样品都位于造山带范围内。由此可见,本区矿石铅的同位素组成具混合铅特征,这种混合是一种与岩浆作用有关的幔源铅与壳源铅的混合,揭示成矿物质在成矿过程中受到多源混染的强烈影响。该结论与原始岩浆来源于深部地幔,且后期与地壳发生了混染作用吻合。因此,区内矿石铅应属壳、幔混合铅。

围岩与矿体地球化学研究表明,矿床形成过程受海水影响,具热水喷流沉积特征;成岩成矿物质来源深部,受多源混染影响,成矿作用时间漫长且过程复杂,具多期成矿复合成因特征。

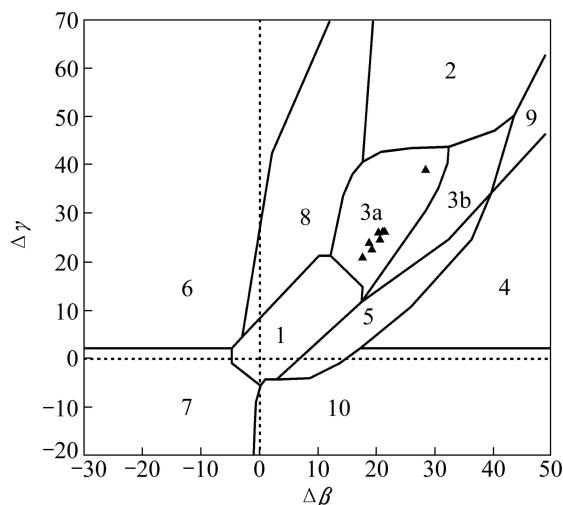


图9 铅同位素  $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$  分类图解<sup>[19]</sup>: 1—地幔铅; 2—上地壳铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用; 3b—沉积作用); 4—化学沉积型铅; 5—海底热水作用铅; 6—中深变质作用铅; 7—深变质下地壳铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅; 10—退变质铅

**Fig. 9**  $\Delta\beta$ - $\Delta\gamma$  diagram of genetic classification by lead isotopes<sup>[19]</sup>: 1—Mantle; 2—Upper crust; 3—Mantle and upper crust mixed subduction zone (3a—Magmatism, 3b—Sedimentation); 4—Chemistry sediments; 5—Hydrothermal sediments on seafloor; 6—Middle to deep metamorphism; 7—Deep metamorphism lower crust; 8—Orogenic belt; 9—Upper crust of old shale; 10—Retrogressive metamorphism

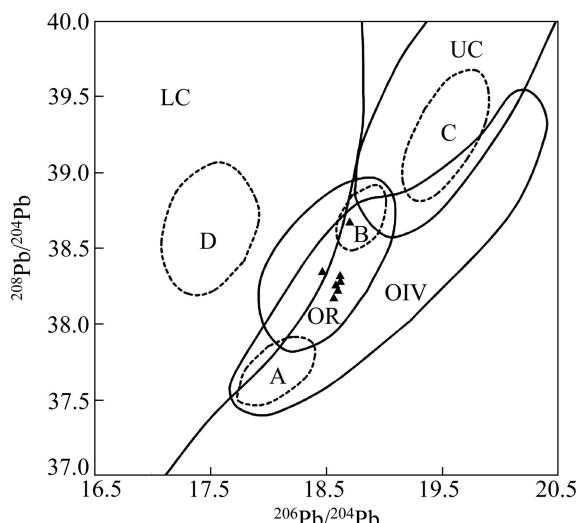


图10 铅同位素构造环境判别图解<sup>[18]</sup>: LC—下地壳; UC—上地壳; OIV—洋岛火山岩; OR—造山带

**Fig. 10** Diagram for discrimination of tectonic setting by lead isotopes<sup>[18]</sup>: LC—Lower crust; UC—Upper crust; OIV—Ocean island volcano rock; OR—Orogenic belt

### 3 肯德可克矿床成岩成矿探讨

肯德可克矿区位于柴达木盆地的西南缘的祁漫塔格弧后盆地, 其总体特征为多期成矿叠加改造而成。本区从早古生代开始基底地壳拉张, 形成祁漫塔格裂陷槽, 在拉张环境中, 沿同生断裂发生了热水喷流沉积作用。这种环境利于热水对流循环, 来源地壳或上地幔的流体沿同生断裂上升, 并不断萃取如滩间山群等富矿质围岩中的有用组分形成成矿流体, 遇到沿张性断裂不断下渗的低温海水引发化学反应, 矿质主体以沉积方式富集, 形成本区大量具原生沉积组构的微细粒胶状黄铁矿和磁黄铁矿以及具隐晶质结构且富含铁锰氢氧化物的硅质岩<sup>[14]</sup>。反应后残余少量矿质的流体继续被加热并与周围岩石发生反应, 或与汇入的陆源碎屑发生反应, 不断萃取富集矿质, 循环作用。但因肯德可克多金属矿床的裂陷环境活动时限较短、热动力能量较小, 笔者认为仅形成规模较小的矿体, 该期成矿作用是矿质的预富集, 为后期岩浆热液叠加改造奠定了基础。

加里东期原特提斯洋盆逐渐缩小, 洋壳向北俯冲, 本区处于弧后裂陷带, 火山岩表现为亲弧裂谷双峰式特征<sup>[20]</sup>。海西-印支期, 东昆仑进入古特提斯洋演化阶段, 洋壳迅速由南向北向俯冲, 洋、陆壳受挤压抬升, 本区发生强烈构造变形, 使深大断裂发生压扭性运动, 这些构造多具深切割和多期活动特征。印支早期以挤压俯冲作用为主, 晚期则为造山作用, 表现为剧烈的壳-幔相互作用, 岩石圈发生拆沉导致岩浆底侵<sup>[21-22]</sup>。深部地质作用及壳幔相互作用深化和扩大了肯德可克矿床的成矿体系, 岩浆沿构造向浅部侵入运移, 为矿床的叠加改造提供了物源和热源, 在喷流沉积成矿作用基础上, 叠加复合形成特有的矽卡岩及铁、铜、铅锌等金属矿化。印支-燕山期, 本区进入强烈陆陆碰撞阶段, 中酸性岩浆岩广泛发育, 并显示出壳、幔岩浆混合的特征。在岩浆热液交代成矿作用下, 成矿流体继续向浅部运移, 受大气降水或其他浅部地体水的影响, 在有利构造空间或破碎围岩中形成中、低温热液矿化, 如钴、金矿化等<sup>[23-25]</sup>。

### 4 结论

1) 肯德可克岩体岩石化学特征表明: 岩石具明显富钠富碱特征, 里特曼组合指数( $\sigma$ )值介于 1.06~2.16 之间, 属于钙碱性岩。稀土和微量地球化学表明原始

岩浆来源于深部, 后期运移至浅部发生混染, 岩体具 I型花岗岩特征, 为壳幔混合来源。

2) 矿区围岩稀土总量( $\Sigma$ REE)低, 配分曲线右倾, 具铕负异常和弱铈负异常, 与海水固有的  $\Sigma$ REE 低, 铈亏损等特点相似, 与热水沉积物金属物雷同, 说明成岩过程有海水参与, 矿床具热水喷流沉积特征。

3) 矿石铅同位素组成具混合铅特征, 这种混合是一种与岩浆作用有关的幔源铅与壳源铅的混合, 揭示成矿物质来源深部并受多源混染影响。

4) 肯德可克矿床具漫长而复杂的演化史, 从基底地壳拉张, 演变为裂隙槽和伸展盆地, 发生喷流活动, 形成早期矿化和硅质岩, 到晚古生代复杂的构造-岩浆活动深化及扩大了成矿体系, 及至印支-燕山期岩石圈拆沉和幔源岩浆底侵作用又叠加了多次热液活动, 因而具多因复成特点。

**致谢:**野外工作得到青海省第三地质矿产勘查院、肯德可克庆华矿业有限公司、徐国端先生和欧阳华平的大力支持和帮助, 在此表示感谢。论文撰写期间得到了王业成、雷源保、宋文彬等人的指导和帮助, 在此一并致谢。

### REFERENCES

- [1] 潘彤. 青海祁漫塔格地区铁多金属成矿特征及找矿潜力[J]. 矿产与地质, 2008, 22(3): 232~235.  
PAN Tong. Metallogenetic characteristics and prospecting potential of the Fe-polymetallic deposits in Qimantage area, Qinghai Province[J]. Mineral Resources and Geology, 2008, 22(3): 232~235.
- [2] 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.  
YI You-chang, JIAO Ge-jun, ZHANG Fen-ying. Characteristics of Kendekke Fe-Co multi-metal deposit in East Kunlun, Qinghai Province[J]. Geology and Prospecting, 2006, 42(3): 30~35.
- [3] 李宏录, 刘养杰, 卫岗. 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.  
LI Hong-lu, LIU Yang-jie, WEI Gang. Geochemistry and genesis of the Kendekke iron-gold polymetallic deposit in Qinghai Province[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2008, 27(4): 378~383.
- [4] 蔡岩萍, 李炯, 梁海川. 青海肯德可克矿区钴多金属矿地质特征及成因初探[J]. 黄金科学, 2011, 19(2): 41~46.  
CAI Yan-ping, LI Jiong, LIANG Hai-chuan. Discussion on the geological characteristics and genesis of Kendekke Co poly-metallic deposit, Qinghai Province[J]. Gold Science and Technology, 2011, 19(2): 41~46.

- [5] 程裕淇. 中国区域地质概况[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-517.  
CHENG Yu-qi. Regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 1-517.
- [6] 孙丰月, 陈国华, 迟效国. 新疆—青海东昆仑成矿带成矿规律和找矿方向综合研究[R]. 北京: 中国地质调查局, 2003.  
SUN Feng-yue, CHEN Guo-hua, CHI Xiao-guo. Research of metallogenic laws and prospect direction of east Kunlun metallogenic belt in Qinghai Province and Xinjiang Province[R]. Beijing: China Geological Survey Bureau, 2003.
- [7] 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: 1-154.  
DING Qing-feng. Metallogenesis and mineral resources assessment in eastern Kunlun orogenic belt[D]. Changchun: Jilin University, 2004: 1-154.
- [8] 姜春发, 王宗起, 李锦轶. 中央造山带开合构造[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-154.  
JIANG Chun-fa, WANG Zong-qi, LI Jing-tie. Opening-closing tectonics of central orogenic belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000: 1-154.
- [9] 青海省地质矿产局. 青海省岩石地层[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1997: 1-340.  
Geology and mineral resources bureau of Qinghai province. Stratigraphy of Qinghai Province[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1997: 1-340.
- [10] 张绍宁. 青海省肯德可克铁金多金属矿床特征、成因及找矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005: 12-16.  
ZHANG Shao-ning. Research of prospecting prediction, characteristics and genesis of Kendekeke iron polymetallic deposit in Qinghai Province[D]. Changsha: Center South University, 2005: 12-16
- [11] HART S R, ALLEGRE C J. Trace element constraints on magma genesis[C]/HARGRAVES R B. Physics of Magmatic Processes. Princeton: Princeton University Press, 1980: 216-226.
- [12] YUAN Feng, ZHOU Tao-fa, YUE Shu-cang. Geochemistry of rare earth elements of Anqing copper deposit in Anhui Province[J]. Journal of Rare Earths, 2002, 20(3): 223-227.
- [13] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-157.  
LI Chang-nian. Trace element geochemistry of igneous[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 1-157.
- [14] 潘彤. 青海东昆仑肯德可克钴、金矿床硅质岩特征及成因[J]. 地质与勘探, 2008, 44(2): 51-54.  
PAN Tong. The mineralization characteristic and prospecting of Kendekeke Co-Bi-Au deposit in East Kunlun, Qinhai Province[J]. Geology and Prospecting, 2008, 44(2): 51-54.
- [15] 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.  
LU Yuan-fa. Geo-Kit: A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. Geochemica, 2004, 33(5): 459-464.
- [16] 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, 28(2): 169-176.  
SHEN Neng-ping, PENG Jian-tang, YUAN Shun-da. Lead isotope composition and its significance for ore-forming material of the Xujianshan Antimonydeposit, Hubei Province[J]. Acta Minerologica Sinica, 2008, 28(2): 169-176.
- [17] 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.
- [18] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbotectonics—the model[J]. Tectonophysics, 1981, 75(1/2): 135-162.
- [19] 朱炳泉, 李献华, 戴樟漠. 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.  
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: 216-226.
- [20] 李欢, 熊小双. 青海虎头崖—肯德可克矿区地球化学特征及其喷流成矿作用[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(3): 772-783.  
LI Huan, XI Xiao-shuang. Geochemistry and sedimentary exhalative mineralization in Hutouya—Kendekeke field, Qinghai Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(3): 772-783.
- [21] 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.  
XI Ren-gang, XIAO Pei-xi, WU Yue-zhong. The Geological significances, composition and age of the monzonitic granite in Kendekeke iron mine[J]. Northwest Geology, 2010, 43(4): 195-202.
- [22] 肖晔, 丰成友, 刘建楠. 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.  
XIAO Ye, FENG Cheng-you, LIU Jian-nan. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating and sulfur isotope characteristics of Kendekeke Fe-polymetallic deposit, Qinghai Province[J]. Mineral Deposit, 2013, 32(1): 177-186.
- [23] 黄敏. 青海省肯德可克多金属矿床特征及成因分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 1-82.  
HUANG Min. Characteristics and genesis of the Kendekeke polymetallic deposit, Qinhai Province[D]. Changsha: Central South University, 2010: 1-82.
- [24] 高永宝, 李文渊, 张照伟. 祁漫塔格地区成矿地质特征及潜力分析[J]. 矿物学报, 2009, 29(S1): 393-394.  
GAO Yong-bao, LI Wen-yuan, ZHANG Zhao-wei. Analysis of geological features and the potential of Qimantage area[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(S1): 393-394.
- [25] 张爱奎, 莫宣学, 李云平, 吕军, 曹永亮, 舒晓峰, 李华. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J]. 地质通报, 2010, 29(7): 1062-1074.  
ZHANG Ai-kui, MO Xuan-xue, LI Yun-ping, LU Jun, CAO Yong-liang, SHU Xiao-feng, LI Hua. New progress and significance in the Qimantage metallogenic belt prospecting, western Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(7): 1062-1074.