

## 青海德合龙洼铜(金)矿成矿物质来源

曹勇华<sup>1,2</sup>, 赖健清<sup>1,2</sup>, 康亚龙<sup>1,2,3</sup>, 樊俊昌<sup>1,2,3</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. 青海西部矿业地质勘查有限公司, 西宁 810016)

**摘要:** 德合龙洼铜(金)矿床为青藏高原北东端的一个岩浆热液型矿床, 成矿作用主要划分为岩浆热液成矿期, 包含石英-黄铜矿和毒砂两个成矿阶段。在分析该矿床成矿地质条件的基础上, 系统地研究了矿区矿石硫、铅同位素组成, 流体包裹体以及稀土元素特征, 探讨了成矿物质来源。研究表明: 矿区矿石硫样品  $\delta^{34}(\text{S}_{\text{CDT}})$  值分布范围较宽 ( $-3.08 \times 10^{-3} \sim 7.00 \times 10^{-3}$ ), 具有岩浆硫性质, 可能来源于矿区侵入的中酸性岩体。各类型矿石铅同位素组成稳定, 显示正常铅的特征, U 和 Th 放射性成因铅含量较低。对各类型矿石铅同位素进行特征参数示踪、铅构造模式示踪和  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  图解示踪的结果表明: 矿区矿石铅主要为地壳与地幔混合的俯冲铅, 主要来源于俯冲造山背景下形成的岩浆侵入体。流体包裹体及稀土元素地球化学特征均表明矿区成矿物质可能主要来源于岩浆侵入体, 少许成矿物质可能来源于周围地层。总结矿区矿石硫、铅同位素、流体包裹体以及稀土元素分析结果, 表明成矿物质主要来源于深部岩浆, 这种岩浆的形成可能与板片俯冲造山有关, 地壳与地幔组分均可提供成矿物质来源。

**关键词:** 德合龙洼; 硫同位素; 铅同位素; 铜(金)矿; 流体包裹体

中图分类号: TP597<sup>+2</sup>; P595

文献标志码: A

## Sources of ore-forming materials of Dehelongwa copper(gold) deposit in Qinghai Province, China

CAO Yong-hua<sup>1,2</sup>, LAI Jian-qing<sup>1,2</sup>, KANG Ya-long<sup>1,2,3</sup>, FAN Jun-chang<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Metallogenic 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. Qinghai Ltd. of Western Mining Geological Prospecting and Survey, Xining 810016, China)

**Abstract:** The Dehelongwa copper(gold) deposit, located in the north-east part of Qinghai-Tibet Plateau, is a magmatic hydrothermal deposit and the mineralization mainly belongs to magmatic hydrothermal mineralization period including two mineralization stages of quartz-chalcopyrite and arsenopyrite. Based on the research related to the deposit's ore-forming geological conditions, the compositions of S, Pb isotopes as well as the characteristics about fluid inclusions and rare earth elements were systematically studied, and the origin of ore-forming materials was discussed. It is shown that the  $\delta^{34}(\text{S}_{\text{CDT}})$  values of ore minerals distribute widely ( $-3.08 \times 10^{-3} \sim 7.00 \times 10^{-3}$ ) and are similar to that of magmatic sulfur, which suggests that the deposit's sulfur may be sourced from the intermediate-acid intrusive rocks. Meanwhile, the Pb isotopic composition of ore sulfides is stable and the ore lead is ordinary common lead with little U and Th radiogenic lead. According to the tracer analysis regarding the characteristic parameters, lead composition model and  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  diagram, the conclusion is drawn that the ore lead is typically crust-mantle mixed subduction lead and comes from intrusive magmatic rocks formed under the circumstance of subduction orogeny. Additionally, the geochemical characteristics about fluid inclusions and rare earth elements both suggest that mass ore-forming materials may originate

from intrusive magmatic rocks while few may be sourced from around strata. Comprehensively, it is believed that ore-forming materials may mainly come from the deep magma formed by subduction orogeny, crust and mantle components both play an important role in providing them.

**Key words:** Dehelongwa; sulfur isotope; lead isotope; copper(gold) deposit; fluid inclusion

现代矿床研究表明,多数矿床都具有成矿物质多来源的特征,重视成矿产物的来源是矿床地球化学的研究趋势,对于了解矿床成因具有重要的意义。目前,判别成矿物质来源的方法主要有地质分析法、矿物学分析法及地球化学分析法(稀土元素和同位素示踪等)。地球化学方法以其可靠性较高的特点已成为研究成矿物质来源必不可少手段之一。例如,对于多数金属矿床,硫是金属元素沉淀的重要矿化剂,因此,硫同位素在一定程度上可以有效地示踪金属矿床成矿产物的来源<sup>[1]</sup>。另一方面,金属硫化物中通常含有一定量的 Pb,同时具低含量的 U 和 Th,所以,金属硫化物结晶以后通过衰变作用产生的放射性成因铅的含量非常低,对硫化物铅同位素组成的贡献量很小,因此, Pb 同位素亦被广泛应用于成矿产物的示踪研究<sup>[2]</sup>。

德合龙洼铜(金)矿位于青海省黄南州同仁县东部,青藏高原北东端,海拔高程 3 310~3 600 m,是一个新发现的以铜矿为主、伴生有金矿的岩浆热液型矿床。由于矿区覆盖层较厚,露头稀少,勘探程度不高,该矿床的地质和矿床研究程度很低。本文作者在已有研究工作的基础上,对矿区矿石硫和铅同位素、稀土元素及流体包裹体进行较为系统的研究,旨在探讨其成矿产物的来源,为研究矿床成矿机制提供依据。

## 1 地质背景

研究区大地构造位置位于西秦岭与南祁连两大构造单元的结合部,为秦岭、祁连山、昆仑山成矿带的交汇部位,属于西秦岭成矿区(见图 1),按地洼学说观点,研究区亦属于巴彦喀拉地洼区。近年来,对于秦、祁、昆结合部的研究取得了许多重要的研究成果。目前倾向于认为秦、祁、昆结合部是一个具有复杂洋陆演化历史的复合型造山带<sup>[3-6]</sup>。

矿区出露地层主要为下二叠统大关山群上岩组( $P_1dg^b$ )及下三叠统隆务河群下岩组( $T_1ln^a$ )。其中:下二叠统大关山群上岩组地层岩性主要为浅变质的碎屑岩和硅化大理岩,地层出露厚度 170~280 m。下三叠统隆务河群下岩组( $T_1ln^a$ )为一套浅变质泥质岩建

造,韵律变化明显,浊积岩特征清晰,化石稀少<sup>[3,7-8]</sup>(见图 2)。

矿区地质构造复杂,自古生代以来,经历了多次构造运动,形成极复杂的褶皱及断裂构造形迹。褶皱构造主要为岗察复式背斜,核部地层为下二叠统大关山群上岩组,两翼地层为下三叠统隆务河群下岩组。该复式背斜次级褶皱发育,主要有双朋西背斜和谢坑背斜等。断裂构造发育,形成于华力西末期—印支期,总体展布方向北西—南东,叠加北东向断裂,形成复杂的构造格局,是本区域主要的控矿和控岩构造<sup>[3,7-8]</sup>(见图 2)。

矿区岩浆活动主要表现为强烈的侵入活动,为印支期造山带 I 型系列花岗岩类,岩性为闪长岩和花岗闪长岩等,组成岗察岩体的主体<sup>[3,7-8]</sup>(见图 2)。

矿体主要产于花岗闪长岩、闪长岩南接触带及三叠系下统碎屑岩中的北西向断裂破碎蚀变岩带内,构造控矿明显。矿石中原生金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、自然金和辉钼矿等,脉石矿物为石英、方解石、绢云母、角闪石和斜长石等。矿石具乳浊状结构、放射状结构、包含结构、交代结构及条带状—团块状、浸染状、细脉浸染状、脉状、网脉状、花斑状、角砾状和揉皱构造。成矿作用过程相对简单,主要划分为岩浆热液成矿期及表生成矿期,表生成矿期主要形成一些简单的氧化型矿物,而岩浆热液成矿期为矿区原生矿形成时期,包含石英—黄铜矿和毒砂两个成矿阶段。其中,石英—黄铜矿阶段矿石矿物组合有黄铜矿、黄铁矿和辉钼矿等<sup>[8]</sup>。

## 2 样品采集及测试

对于德合龙洼矿区 S 和 Pb 同位素研究,前人先后做过一些工作,如息朝庄<sup>[5]</sup>、傅晓明和息朝庄<sup>[6]</sup>主要针对矿区黄铜矿和黄铁矿等矿物测试了 S 和 Pb 的同位素组成,但相对而言样品数目较少且只能说明石英—黄铜矿阶段成矿特征,对于矿区 Au 的主要载体矿物毒砂(毒砂阶段)S 和 Pb 同位素组成尚未测定,这可能导致对矿区成矿背景认识不够全面。针对以上不足,在收集前人同位素测试资料的基础上,本文作者主要

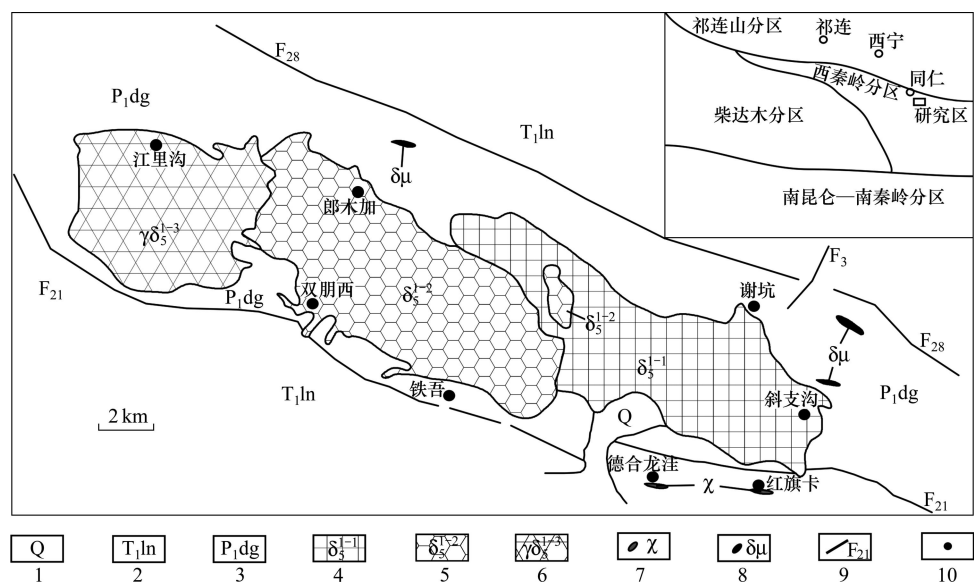


图 1 德合龙洼矿区区域地质图(据文献[4]修改): 1—第四系; 2—三叠系下统隆务河群; 3—二叠系下统大关山群; 4—闪长岩; 5—花岗闪长岩; 6—斑状花岗闪长岩; 7—煌斑岩脉; 8—闪长岩脉; 9—断裂; 10—铜金矿床

Fig. 1 Regional geological map of Dehelongwa deposit (modified from Ref. [4]): 1—Quaternary; 2—Triassic Lower Longwuhe group; 3—Permian Lower Daguanshan group; 4—Diorite; 5—Granodiorite; 6—Porphyritic granodiorite; 7—Lamprophyre vein; 8—Diorite-dyke; 9—Fault; 10—Copper-gold deposit

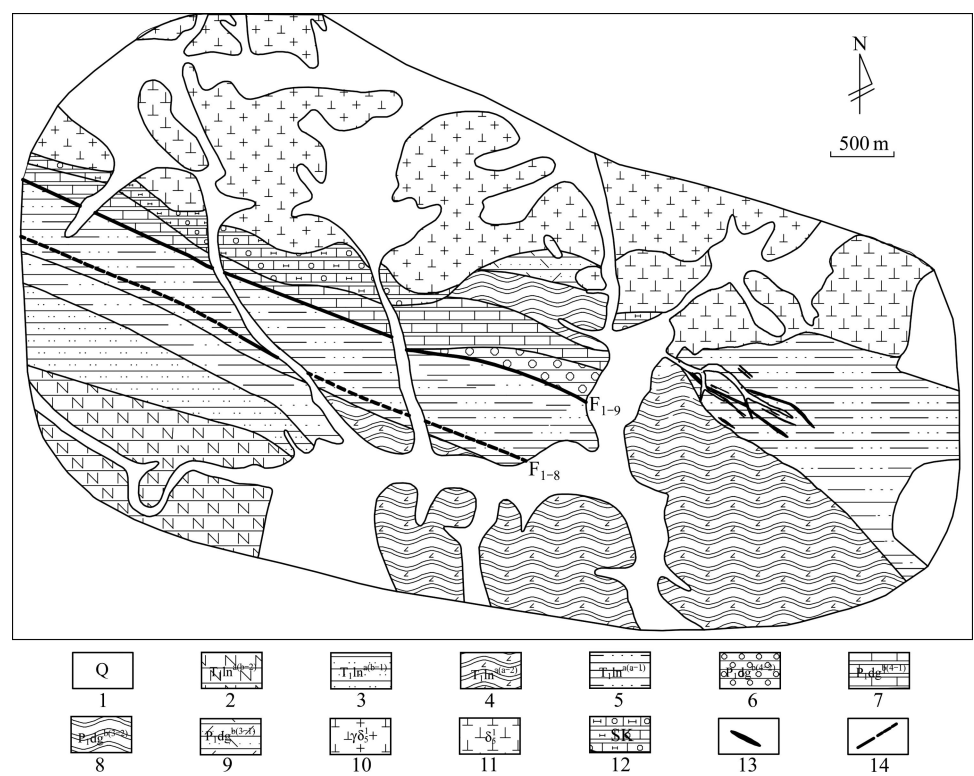


图 2 德合龙洼铜(金)矿矿区地质简图: 1—第四系; 2—长石石英砂岩; 3—石英砂岩; 4—硅质板岩及砂岩; 5—粉砂岩及角岩化板岩; 6—含砾中粗粒砂岩; 7—硅化大理岩; 8—泥质板岩夹砂岩; 9—细粒长石砂岩; 10—花岗闪长岩; 11—闪长岩; 12—夕卡岩; 13—矿体; 14—实测及推测断层

Fig. 2 Geologic sketch map of Dehelongwa Cu(Au) deposit: 1—Quaternary; 2—Feldspathic quartz sandstone; 3—Quartz sandstone; 4—Siliceous slate and sandstone; 5—Siltstone and hornfelsed slate; 6—Pebbled coarse sandstone; 7—Silicified marble; 8—Argillite and sandstone; 9—Fine-grained feldspar sandstone; 10—Granodiorite; 11—Diorite; 12—Skarn; 13—Orebody; 14—Measured and inferred fault

侧重采取德合龙洼不同勘探线钻孔岩体中的毒砂矿物进行同位素分析。S 和 Pb 同位素研究用样品均送至武汉地质矿产研究院进行分析。进行 S 同位素测试时采取传统的流程,即先将样品按比例加入 Cu<sub>2</sub>O,然后置于马沸炉中,在 1 050~1 060 ℃真空条件下反应制备 SO<sub>2</sub>,最后在质谱仪上进行测试,误差控制在±0.2%。进行 Pb 同位素测试时,所用仪器为 MAT261 质谱仪,同位素比值用 NBS2981 标准样重复测试结果(<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=16.923±3, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.467±3, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=36.733±6)所确定的单位原子质量 0.1%的分馏系数进行校正,分析的总体误差在 0.05%以内。

稀土元素方面,在收集前人有关矿石矿物稀土元素测试资料的基础上,本研究主要采取有矿区不同类型新鲜成矿岩体(花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩),并送桂林矿产地质研究院进行稀土元素测试。测试采用 ICP-MS 方法,所用仪器为 X series 电感耦合等离子体质谱仪。

### 3 测试结果

#### 3.1 硫同位素组成特点

表 1 给出了本次工作测试及前人发表的德合龙洼矿区硫同位素数据。由表 1 可知,德合龙洼矿区 14 件硫化物(毒砂、黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿)样品的 δ(<sup>34</sup>S<sub>CDT</sub>)值为-3.08×10<sup>-3</sup>~7.00×10<sup>-3</sup>,分布范围较宽。对于不同样品,9 件毒砂样品 δ(<sup>34</sup>S<sub>CDT</sub>)=-3.08×10<sup>-3</sup>~5.45×10<sup>-3</sup>,平均值为-0.74×10<sup>-3</sup>;2 件黄铜矿样品的 δ(<sup>34</sup>S<sub>CDT</sub>)值则介于 4.5×10<sup>-3</sup>~5.0×10<sup>-3</sup>之间,平均值为 4.8×10<sup>-3</sup>;2 件黄铁矿样品的 δ(<sup>34</sup>S<sub>CDT</sub>)为 2.2×10<sup>-3</sup>~7.0×10<sup>-3</sup>,平均值为 4.6×10<sup>-3</sup>;1 件辉钼矿样品 δ(<sup>34</sup>S<sub>CDT</sub>)为 6.2×10<sup>-3</sup>(见表 1)。一般而言,硫化物—H<sub>2</sub>S 达到平衡时,硫化物中 δ(<sup>34</sup>S<sub>CDT</sub>)富集由大到小的顺序是辉钼矿、黄铁矿、闪锌矿(磁黄铁矿)、黄铜矿、铜

表 1 德合龙洼矿石硫化物 S、Pb 同位素组成

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

| 序号 | 样号         | 测试矿物 | δ( <sup>34</sup> S)/10 <sup>-3</sup> | <sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb | <sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb |
|----|------------|------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | DH-26      | 毒砂   | -3.08                                | 18.021                               | 15.513                               | 38.075                               |
| 2  | DH-32      | 毒砂   | -1.54                                | 18.118                               | 15.476                               | 38.108                               |
| 3  | DK-27      | 毒砂   | 1.61                                 |                                      |                                      |                                      |
| 4  | DK-18      | 毒砂   | -2.31                                | 18.227                               | 15.551                               | 38.390                               |
| 5  | DK-11      | 毒砂   | 5.45                                 | 18.019                               | 15.515                               | 38.079                               |
| 6  | DK-26      | 毒砂   | 0.23                                 | 18.605                               | 15.562                               | 38.617                               |
| 7  | DK-12      | 毒砂   | -2.31                                | 18.185                               | 15.535                               | 38.230                               |
| 8  | DK-9       | 毒砂   | -1.67                                | 18.070                               | 15.562                               | 38.247                               |
| 9  | DK-20      | 毒砂   |                                      | 18.458                               | 15.616                               | 38.644                               |
| 10 | KQ20082315 | 黄铜矿  | 4.5                                  |                                      |                                      |                                      |
| 11 | KQ20082317 | 辉钼矿  | 6.2                                  |                                      |                                      |                                      |
| 12 | KQ20082318 | 黄铁矿  | 7.0                                  |                                      |                                      |                                      |
| 13 | KQ20082316 | 黄铜矿  | 5.0                                  |                                      |                                      |                                      |
| 14 | KQ20082314 | 黄铁矿  | 2.2                                  |                                      |                                      |                                      |
| 15 | SPX-1      | 黄铁矿  |                                      | 18.058                               | 15.581                               | 38.154                               |
| 16 | SPX-3      | 黄铁矿  |                                      | 18.163                               | 15.590                               | 38.191                               |
| 17 | SPX-5      | 黄铁矿  |                                      | 18.384                               | 15.625                               | 38.385                               |
| 18 | SPX-6      | 黄铁矿  |                                      | 18.476                               | 15.641                               | 38.531                               |
| 19 | SPX-8      | 黄铁矿  |                                      | 18.710                               | 15.636                               | 38.416                               |

1~10 测试数据来自于本研究,测试单位为武汉地质矿产研究院,11~19 测试数据来自文献[5]。

1-10 testing data sourcing from this paper are tested by Wuhan Research Institute of Geology and Minerals, 11-19 testing data come from Ref. [5].

蓝、方铅矿、辰砂、辉铜矿(辉锑矿)、辉银矿<sup>[9]</sup>。另外, 根据硫的高价态化合物相对低价化合物普遍富集重同位素的规律可知,  $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$  值的矿物顺序由大到小为黄铁矿、黄铜矿、毒砂。尽管矿区上述 4 种硫化物中毒砂与黄铜矿、黄铁矿与辉钼矿  $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$  值存在部分重叠, 但整体而言, 它们与成矿体系平衡条件下的硫化物中  $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$  的富集顺序基本一致, 表明在金属硫化物沉淀过程中硫同位素分配已近达到平衡。

3.2 铅同位素组成特点

由表 1 可知, 8 件毒砂样品的  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值介于 18.019~18.605, 平均值为 18.213, 极差为 0.213;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值介于 15.476~15.616, 平均值为 15.541, 极差为 0.042;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值则为 38.075~38.644, 平均值为 38.299, 极差为 0.230。5 件黄铁矿样品  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值变化范围为 18.058~18.710, 平均值为 18.352, 极差为 0.298;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 15.581~15.641, 平均值为 15.612, 极差为 0.030;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值为 38.191~38.531, 平均值为 38.323, 极差 0.181。总体而言, 上述各不同矿石铅同位素比值较为稳定, 变化范围较小, 基本显示正常铅的特征, U 和 Th 放射性成因铅含量较低。

利用 H-H 单阶段铅演化模式<sup>[10]</sup>, 根据 Geokit 程序<sup>[11]</sup>计算得出德合龙洼铜金矿床矿石硫化物铅同位素相关参数, 结果见表 2。

由表 2 可知, 矿石铅  $\mu$  值的变化范围为 9.25~9.49, 平均值为 9.37, Th/U 值变化范围为 3.50~3.83, 平均

值为 3.76。显然, 两个参数值均较小, 且都落入正常铅的变化范围内。由表 1 通过计算可知, 9 件毒砂样品  $m(^{206}\text{Pb})/m_0$  比值为 0.251~0.254、 $m(^{207}\text{Pb})/m_0$  比值为 0.215~0.217、 $m(^{208}\text{Pb})/m_0$  比值为 0.531~0.532; 5 件黄铁矿样品  $m(^{206}\text{Pb})/m_0$  比值范围为 0.252~0.257、 $m(^{207}\text{Pb})/m_0$  比值为 0.215~0.217、 $m(^{208}\text{Pb})/m_0$  比值为 0.528~0.531, 其中,  $m(^{206}\text{Pb})=^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $m(^{207}\text{Pb})=^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $m(^{208}\text{Pb})=^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $m_0=m(^{206}\text{Pb})+m(^{207}\text{Pb})+m(^{208}\text{Pb})$ 。将以上数值投在卡农铅同位素组成三角图<sup>[12]</sup>(见图 3)中, 发现各散点非常接近(见图 3 阴影部分), 均落入卡农铅同位素演化图的正常铅小三角形( $w(^{206}\text{Pb})=$

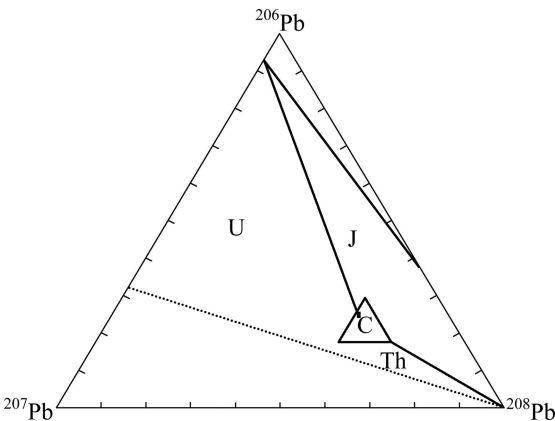


图 3 德合龙洼矿石卡农铅同位素演化图解<sup>[12]</sup>: C—正常铅; Th—钍铅; U—异常铀铅区间; J—J 区间

Fig. 3 Canon Pb isotope histogram of Dehelongwa Cu(Au) deposit<sup>[12]</sup>: C—Common lead; Th—Thorium lead; U—Anomalous uranium lead district; J—J district

表 2 德合龙洼矿区矿石 Pb 同位素组成的相关参数

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

| 样号    | 测试矿物 | 表面年龄/Ma | $\varphi$ | $\mu$ | Th/U | $\Delta\alpha$ | $\Delta\beta$ | $\Delta\gamma$ | 资料来源  |
|-------|------|---------|-----------|-------|------|----------------|---------------|----------------|-------|
| H-26  | 毒砂   | 344     | 0.599     | 9.34  | 3.77 | 64.60          | 13.20         | 31.01          | 本研究   |
| DH-32 | 毒砂   | 226     | 0.588     | 9.25  | 3.72 | 60.98          | 10.21         | 26.72          |       |
| DK-18 | 毒砂   | 203     | 0.586     | 9.38  | 3.77 | 65.56          | 15.00         | 33.31          |       |
| DK-11 | 毒砂   | 347     | 0.599     | 9.34  | 3.77 | 64.72          | 13.35         | 31.25          |       |
| DK-26 | 毒砂   | -26.1   | 0.567     | 9.37  | 3.70 | 70.08          | 14.80         | 29.48          |       |
| DK-12 | 毒砂   | 251     | 0.590     | 9.36  | 3.75 | 66.86          | 14.18         | 31.10          |       |
| DK-20 | 毒砂   | 367     | 0.601     | 9.43  | 3.83 | 69.35          | 16.52         | 36.69          |       |
| DK-9  | 毒砂   | 152     | 0.582     | 9.49  | 3.80 | 75.08          | 19.02         | 37.90          |       |
| SPX-1 | 黄铁矿  | 399     |           | 9.47  | 3.79 | 71.21          | 17.93         | 35.58          | 文献[5] |
| SPX-3 | 黄铁矿  | 334     |           | 9.47  | 3.76 | 72.17          | 18.18         | 33.70          |       |
| SPX-5 | 黄铁矿  | 217     |           | 9.52  | 3.73 | 75.85          | 19.90         | 33.79          |       |
| SPX-6 | 黄铁矿  | 170     |           | 9.54  | 3.75 | 77.56          | 20.73         | 35.67          |       |
| SPX-8 | 黄铁矿  | -7      |           | 9.51  | 3.58 | 78.07          | 19.72         | 25.23          |       |

$\Delta\alpha=[\alpha/\alpha M(t)-1]\times 1\,000$ ,  $\Delta\beta=[\beta/\beta M(t)-1]\times 1\,000$ ,  $\Delta\gamma=[\gamma/\gamma M(t)-1]\times 1\,000$ .

19%,  $w(^{207}\text{Pb})=20\%$ ,  $w(^{208}\text{Pb})=52\%$ )中, 且非常接近正常铅演化曲线, 表明矿石铅为不含放射性成因铅的普通铅。

3.3 REE 含量特征

表 3 所列为德合龙洼铜金矿床各类型新鲜岩体及收集到的矿区矿化石英、黄铁矿 REE 含量及特征参

表 3 德合龙洼岩体及石英、黄铁矿 REE 丰度及特征值

Table 3 REE abundance and characteristics of intrusive rocks, quartzes and pyrites from Dehelongwa deposit

| 样品     | 岩性(矿物)   | $w/10^{-6}$ |       |      |       |                    |       |                                         |                     |                     |                       |                       |
|--------|----------|-------------|-------|------|-------|--------------------|-------|-----------------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
|        |          | La          | Ce    | Pr   | Nd    | Sm                 | Eu    | Gd                                      | Tb                  | Dy                  | Ho                    | Er                    |
| DF-1   | 黑云母花岗闪长岩 | 11.60       | 24.80 | 3.10 | 13.00 | 3.42               | 0.79  | 3.35                                    | 0.56                | 3.47                | 0.70                  | 2.19                  |
| DF-4   | 黑云母钾长花岗岩 | 27.50       | 54.40 | 5.80 | 20.50 | 4.34               | 0.79  | 4.23                                    | 0.63                | 3.65                | 0.72                  | 2.28                  |
| DF-6   | 黑云母钾长花岗岩 | 24.00       | 46.50 | 5.28 | 18.90 | 4.15               | 0.83  | 3.70                                    | 0.59                | 3.37                | 0.67                  | 2.07                  |
| DF-9   | 闪长玢岩     | 24.00       | 53.20 | 6.39 | 25.80 | 6.20               | 1.40  | 6.06                                    | 0.96                | 5.76                | 1.19                  | 3.59                  |
| DF-11  | 黑云母钾长花岗岩 | 14.00       | 34.80 | 4.54 | 18.80 | 4.23               | 0.75  | 3.45                                    | 0.49                | 2.49                | 0.52                  | 1.52                  |
| DF-12  | 灰色细粒花岗岩  | 2.90        | 8.30  | 1.19 | 5.60  | 1.43               | 0.28  | 1.63                                    | 0.27                | 1.77                | 0.34                  | 1.02                  |
| DH-19  | 细粒闪长岩    | 16.70       | 35.10 | 4.11 | 17.20 | 3.86               | 1.14  | 4.28                                    | 0.67                | 4.07                | 0.82                  | 2.44                  |
| DH-28  | 钾长花岗闪长岩  | 15.40       | 39.90 | 5.02 | 21.00 | 4.46               | 0.92  | 4.51                                    | 0.69                | 4.10                | 0.83                  | 2.46                  |
| DHLW11 | 石英       | 8.17        | 12.54 | 1.97 | 7.81  | 1.65               | 0.29  | 1.37                                    | 0.21                | 1.04                | 0.21                  | 0.59                  |
| DHLW12 | 石英       | 44.21       | 76.21 | 8.25 | 27.31 | 4.92               | 0.59  | 4.36                                    | 0.63                | 3.72                | 0.72                  | 2.32                  |
| DHLW13 | 石英       | 4.95        | 9.96  | 1.28 | 4.62  | 1.51               | 0.15  | 1.42                                    | 0.32                | 2.29                | 0.47                  | 1.73                  |
| DHLW15 | 石英       | 39.93       | 70.61 | 8.12 | 26.22 | 4.57               | 0.73  | 3.91                                    | 0.59                | 2.92                | 0.56                  | 1.76                  |
| DHLW16 | 黄铁矿      | 18.35       | 33.47 | 3.96 | 14.66 | 2.91               | 0.75  | 2.85                                    | 0.50                | 2.87                | 0.56                  | 1.61                  |
| DHLW17 | 黄铁矿      | 12.69       | 25.96 | 3.49 | 15.79 | 3.69               | 0.79  | 4.17                                    | 0.72                | 4.37                | 0.68                  | 1.74                  |
| DHLW18 | 黄铁矿      | 12.62       | 25.85 | 3.56 | 15.74 | 3.77               | 0.73  | 4.11                                    | 0.69                | 4.27                | 0.84                  | 2.42                  |
| 样品     | 岩性(矿物)   | $w/10^{-6}$ |       |      |       |                    | $L/H$ | $\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$ | $\delta(\text{Eu})$ | $\delta(\text{Ce})$ | $\text{La}/\text{Sm}$ | $\text{La}/\text{Yb}$ |
|        |          | Tm          | Yb    | Lu   | Y     | $\Sigma\text{REE}$ |       |                                         |                     |                     |                       |                       |
| DF-1   | 黑云母花岗闪长岩 | 0.30        | 2.14  | 0.31 | 19.20 | 88.93              | 1.76  | 3.51                                    | 0.71                | 0.91                | 3.39                  | 5.42                  |
| DF-4   | 黑云母钾长花岗岩 | 0.31        | 2.32  | 0.35 | 20.50 | 148.32             | 3.24  | 7.67                                    | 0.56                | 0.93                | 6.34                  | 11.85                 |
| DF-6   | 黑云母钾长花岗岩 | 0.28        | 2.01  | 0.31 | 18.90 | 131.56             | 3.12  | 7.73                                    | 0.64                | 0.89                | 5.78                  | 11.94                 |
| DF-9   | 闪长玢岩     | 0.53        | 3.39  | 0.52 | 33.10 | 172.09             | 2.12  | 4.58                                    | 0.70                | 0.95                | 3.87                  | 7.08                  |
| DF-11  | 黑云母钾长花岗岩 | 0.20        | 1.42  | 0.21 | 14.10 | 101.52             | 3.16  | 6.38                                    | 0.59                | 0.97                | 3.31                  | 9.86                  |
| DF-12  | 灰色细粒花岗岩  | 0.13        | 0.92  | 0.12 | 9.70  | 35.60              | 1.24  | 2.04                                    | 0.56                | 0.99                | 2.03                  | 3.15                  |
| DH-19  | 细粒闪长岩    | 0.32        | 2.26  | 0.32 | 21.70 | 114.99             | 2.12  | 4.78                                    | 0.86                | 0.93                | 4.33                  | 7.39                  |
| DH-28  | 钾长花岗闪长岩  | 0.35        | 2.27  | 0.34 | 23.10 | 125.35             | 2.24  | 4.39                                    | 0.63                | 1.01                | 3.45                  | 6.78                  |
| DHLW11 | 石英       | 0.08        | 0.73  | 0.13 | 8.83  | 45.65              | 2.46  | 7.22                                    | 0.58                | 0.68                | 4.94                  | 11.16                 |
| DHLW12 | 石英       | 0.36        | 2.61  | 0.41 | 25.94 | 202.59             | 3.93  | 10.95                                   | 0.38                | 0.84                | 8.98                  | 16.93                 |
| DHLW13 | 石英       | 0.33        | 2.55  | 0.43 | 19.04 | 51.07              | 0.79  | 1.26                                    | 0.31                | 0.87                | 3.28                  | 1.94                  |
| DHLW15 | 石英       | 0.28        | 2.06  | 0.32 | 22.52 | 185.12             | 4.30  | 12.53                                   | 0.52                | 0.84                | 8.74                  | 19.37                 |
| DHLW16 | 黄铁矿      | 0.29        | 1.71  | 0.31 | 22.01 | 106.83             | 2.26  | 6.94                                    | 0.80                | 0.85                | 6.30                  | 10.72                 |
| DHLW17 | 黄铁矿      | 0.27        | 1.68  | 0.27 | 15.78 | 92.07              | 2.10  | 4.90                                    | 0.62                | 0.86                | 3.44                  | 7.57                  |
| DHLW18 | 黄铁矿      | 0.40        | 2.27  | 0.37 | 16.57 | 94.20              | 1.95  | 3.59                                    | 0.57                | 0.85                | 3.35                  | 5.55                  |

岩体稀土元素测试资料来源于本研究, 测试单位为桂林矿产研究院; 石英、黄铁矿稀土元素资料参照文献[9]。  
REE testing data of intrusions coming from this paper are tested by Guilin Research Institute of Geology and Mineral Resources;  
REE testing data of quartzes and pyrites come from Ref. [9].

数。由表3可见,德合龙洼矿区成矿岩体的 $\Sigma\text{REE}$ 介于 $88.93 \times 10^{-6} \sim 172.09 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 $126.11 \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土比值( $L/H$ )介于1.76~3.24之间,平均值为2.54, $\delta(\text{Eu})=0.56 \sim 0.86$ ,平均值为0.67, $\delta(\text{Ce})=0.89 \sim 1.01$ ,平均值为0.94;黄铁矿样品的 $\Sigma\text{REE}$ 为 $92.07 \times 10^{-6} \sim 106.83 \times 10^{-6}$ ,平均值为 $97.70 \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土比值( $L/H$ )介于1.95~2.26之间,平均值为2.10, $\delta(\text{Eu})=0.57 \sim 0.80$ ,平均值为0.66, $\delta(\text{Ce})=0.85 \sim 0.86$ ,平均值为0.85;石英样品的 $\Sigma\text{REE}$ 则介于 $45.65 \times 10^{-6} \sim 202.59 \times 10^{-6}$ ,均值为 $121.11 \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土比值( $L/H$ )介于0.79~4.30之间,平均值为2.87, $\delta(\text{Eu})=0.31 \sim 0.58$ ,平均值为0.45, $\delta(\text{Ce})=0.68 \sim 0.87$ ,平均值为0.81。

## 4 成矿物质来源探讨

### 4.1 硫同位素地球化学证据

成矿物质来源示踪是硫同位素应用最广的内容,也是热液成矿作用研究的核心问题,确定硫的来源能起到很好的成矿物质示踪作用。一般而言,确定矿源的总硫同位素组成方能更好地示踪成矿物质的来源<sup>[13]</sup>,而在矿物组合简单的情况下,硫化物中的平均值可以大致代表热液的总硫同位素组成<sup>[14]</sup>。考虑到矿区硫化物矿物组合相对简单且可进一步划分为两个成矿阶段(石英-黄铜矿阶段和毒砂阶段),且两阶段的 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 相差甚远,表明硫的来源有异,故本研究按阶段考虑硫同位素组成特点应更可靠。如前所述,石英-黄铜矿阶段中2件黄铜矿样品的 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 值则介于 $4.5 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ 之间,平均值为 $4.75 \times 10^{-3}$ ;2件黄铁矿样品的 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 为 $2.2 \times 10^{-3} \sim 7.0 \times 10^{-3}$ ,均值为 $4.6 \times 10^{-3}$ ;1件辉钼矿样品 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 为 $6.2 \times 10^{-3}$ ,均以较大正值为特征且平均值较接近。毒砂阶段,9件毒砂样品的 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})=-3.08 \times 10^{-3} \sim 5.45 \times 10^{-3}$ ,平均值为 $-0.74 \times 10^{-3}$ ,以小负值为特征。一般而言,矿床中硫来源是多样的,可分为3类:地幔硫、地壳硫和混合硫<sup>[15]</sup>。徐文欣<sup>[16]</sup>根据600多件样品硫同位素数据统计,指出典型岩浆硫来源矿床的溶液全硫同位素组成为 $-2 \times 10^{-3} \sim 6.5 \times 10^{-3}$ ,显然,各阶段样品 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 的平均值均落在该范围内,表明两阶段硫的来源可能与岩浆硫有关,考虑到矿区侵入岩体为一套中酸性岩浆岩,说明矿区硫来源应与中酸性岩浆岩有关。因此,由硫同位素分析结果可知,矿区硫源主要来自于矿区内酸性侵入岩。

### 4.2 铅同位素地球化学证据

铅的来源判断对于成矿物质示踪具有重要的意

义,目前对矿石铅源的判断主要方法有:特征参数示踪、铅构造模式示踪和 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 图解析示踪等。每种方法都可能存在解释缺陷,但结合以上方法综合考虑,可得出较为可靠的结论。

1) 铅的来源可以通过利用铅同位素源区特征值进行初步判断。其中, $\mu$ 值的变化可以有效地提供地质体经历地质作用的信息,反映铅的来源<sup>[17]</sup>。一般而言,具有低 $\mu$ 值( $\mu < 9.58$ )的铅通常认为来自下地壳或上地幔U、Th相对稀缺的物质<sup>[18]</sup>,如表2可知,矿区毒砂铅 $\mu$ 值的变化范围为9.25~9.54,均小于9.58,故可初步判断矿区毒砂矿物铅源具有下地壳或上地幔物质的性质。

2) 为进一步探讨德合龙洼铜金矿矿石铅的来源,将所测铅同位素组成数据投影到Zartman铅构造模式图<sup>[19]</sup>即 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 及 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造环境演化图解中(见图4)。由 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 模式图可知,德合龙洼矿区各矿石铅同位

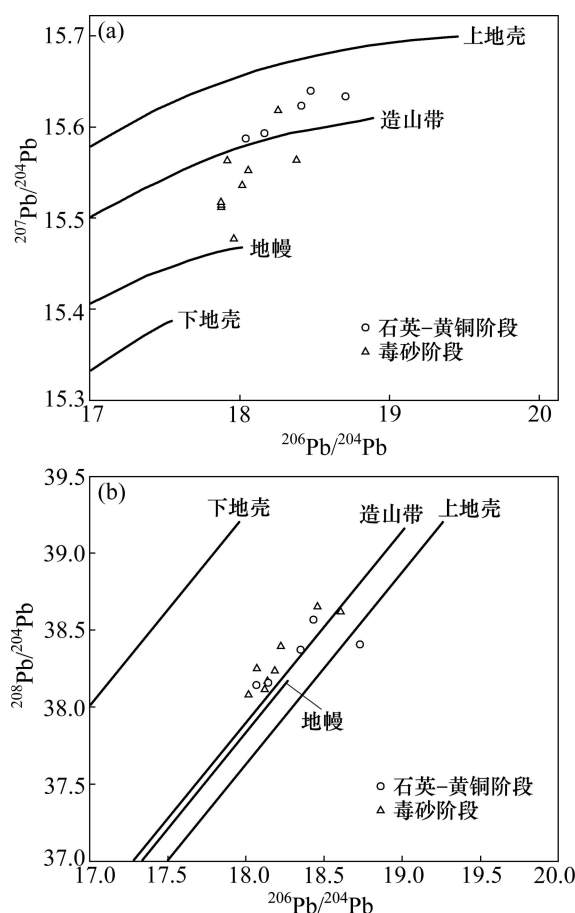


图4 矿石 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b)构造模式图<sup>[19]</sup>

Fig. 4 Diagrams of  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (a) and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  (b) lead isotopic compositions of Dehelongwa deposit<sup>[19]</sup>

素样品均落在上地幔与上地壳之间, 大多比较靠近造山带演化曲线, 其中, 岩浆热液成矿期毒砂阶段样品主要落在上地幔与造山带区间内, 而石英-黄铜矿阶段黄铜矿、黄铁矿和辉钼矿则基本落在上地壳与造山带之间。 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  构造源区判别图中显示, 除一个石英-黄铜矿阶段样品落在上地壳区间内, 其余各样品均落在地幔与下地壳区间内且靠近造山带演化曲线, 线性分布明显。综合两图分析结果, 认为矿区矿石铅可能主要来源于与俯冲造山作用有关的地壳与地幔物质的混合。

3) 朱炳泉等<sup>[20]</sup>在收集大量资料的基础上, 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 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$  和 $\Delta\gamma$ , 并通过 $\Delta\gamma$ — $\Delta\beta$  成因分类图解, 追踪矿石铅源区的方法。该模式消除了时间因素的影响, 理论上比全球性的演化模式具有更好的示踪意义<sup>[21]</sup>。

表 2 给出了经计算的德合龙洼矿区石英-黄铜矿阶段黄铁矿及毒砂阶段毒砂矿物铅与同时代地幔的相对偏差值 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$  和 $\Delta\gamma$ 。将所得参数值投影到矿石铅同位素 $\Delta\gamma$ — $\Delta\beta$  成因分类图解(见图 5)中, 发现除少数毒砂样品落在造山带铅区间或与俯冲铅区间交线上外, 其余样品(黄铁矿、毒砂)均全部落在上地壳与地幔混合的俯冲铅(岩浆成因)范围内。由此可推断, 矿区两阶段矿石铅应主要来自于俯冲造山作用导致的地壳与地幔物质的混合, 与岩浆作用有关, 这一结论与 Zartman 铅构造模式图所分析的结果基本一致。

如前所述, 研究区大地构造位置位于西秦岭与南祁连两大构造单元的结合部, 属于西秦岭成矿区, 按地洼学说观点, 西秦岭成矿区属于巴彦喀拉地洼区。陈国达<sup>[22]</sup>认为, 该地洼区在早古生代已经处于地槽发育阶段, 晚古生代地槽拗陷向北沿至西秦岭, 海西末期因受西邻的昆仑、藏北地带褶皱封闭的影响, 该区地槽活动逐渐减弱。三叠纪早期, 全区再次出现大规模的沉陷, 海侵广泛, 至三叠纪晚期, 海水退出并导致全区褶皱、断裂上升形成褶皱带即西秦岭造山带。由于三叠纪早至晚期是该地洼区经历海侵至海退阶段, 故按板块构造观点可知该时期内发生有洋壳(现有资料表明为勉略洋壳)的俯冲。因勉略洋壳俯冲时期即早中三叠纪对应的年龄区间为 250~210 Ma, 与成矿岩体形成年代(印支期)相当, 表明德合龙洼矿区成矿岩体的形成极有可能形成于俯冲造山背景下, 与勉略洋壳重熔相关。另外, 曹勇华<sup>[23]</sup>通过对矿区成矿岩体进行微量分析认为, 德合龙洼矿区成矿岩体的形成背景与洋壳俯冲相关, 很可能为岛弧或活动大陆边缘环境。

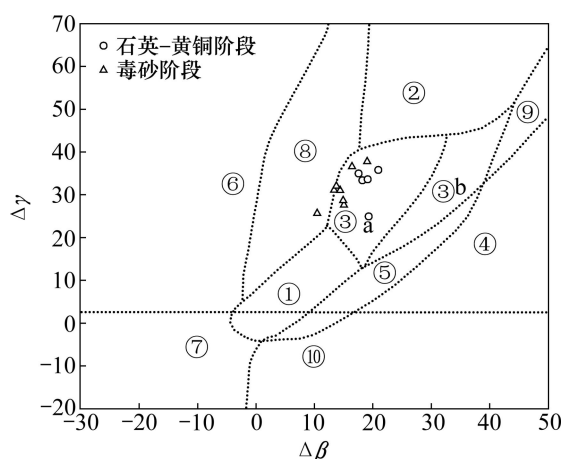


图 5 矿石铅同位素 $\Delta\gamma$ — $\Delta\beta$  成因分类图解<sup>[20]</sup>: ①—地幔铅; ②—上地壳铅; ③—上地壳与地幔混合的俯冲铅(a—岩浆作用, b—沉积作用); ④—化学沉积型铅; ⑤—海底热水作用铅; ⑥—中深变质作用铅; ⑦—深变质下地壳铅; ⑧—造山带铅; ⑨—古老页岩上地壳铅; ⑩—退变质铅

Fig. 5  $\Delta\gamma$ — $\Delta\beta$  diagram of genetic classification by ore lead isotopes: ①—Mantle; ②—Upper crust; ③—Mantle and upper crust mixed subduction zone (a—Magmatism, b—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

因此, 矿石铅来源于俯冲造山背景下形成的侵入岩体这一结论符合矿区地质成矿环境。

从以上 3 方面分析可知, 德合龙洼铜金矿床矿石铅主要为地壳与地幔混合的俯冲铅, 主要来源于俯冲造山背景下形成的岩浆侵入体。

#### 4.3 REE 地球化学证据

稀土元素(REE)属于不活泼元素, 在一定地球化学过程中具有相似的地球化学特征和地球化学行为, 可用来有效地示踪成矿物质及成矿流体来源<sup>[24]</sup>。

根据表 3 稀土元素数据绘制球粒陨石标准化曲线(见图 6)。由图 6 可见, 德合龙洼铜金矿床各类型成矿岩体与石英、黄铁矿球粒标准化配分曲线具有较好的一致性, 均显示出右倾的曲线且为负铕异常。其中, 3 个黄铁矿样品(DHLW16、DHLW17、DHLW18)与大部分成矿岩体(除 DF-12 外)的配分曲线几乎一致(见图 6), 具体表现如下: 二者具有相似的轻重稀土元素比值(成矿岩体  $L/H=1.76\sim3.24$ , 平均值为 2.54; 黄铁矿  $L/H=1.95\sim2.26$ , 平均值为 2.10)、相似的负铕异常及负铈异常(成矿岩体  $\delta(\text{Eu})=0.56\sim0.86$ , 平均值为



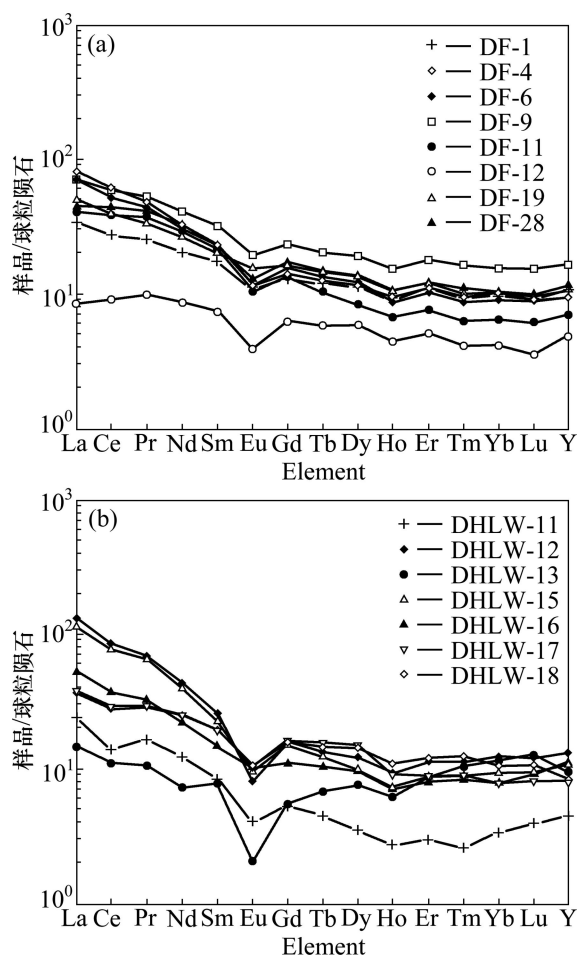


图6 德合龙洼矿区岩体(a)、矿化石英和黄铁矿(b)稀土元素球粒陨石标准化模式图

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of intrusive rocks (a), mineralized quartz and pyrite (b) in Dehelongwa deposit

0.67,  $\delta(\text{Ce})=0.89\sim 1.01$ , 平均值为 0.94; 黄铁矿  $\delta(\text{Eu})=0.57\sim 0.80$ , 平均值为 0.66,  $\delta(\text{Ce})=0.85\sim 0.86$ , 平均值为 0.85, 因此, 二者稀土元素配分的一致性表明它们可能来源一致, 细微差别可能与少量地层来源成矿物质混入有关。另一方面, 作为石英-黄铜矿阶段主要脉石矿物的 4 个石英样品(DHLW11、DHLW12、DHLW13、DHLW15)稀土元素配分曲线与岩体和黄铁矿相比大同小异, 主要差别体现在配分曲线多向右陡倾(见图 6)且极富轻稀土元素( $L/H=2.46\sim 4.30$ ), 负铕异常加剧( $\delta(\text{Eu})=0.31\sim 0.58$ ), 表明其形成物理化学环境可能有所改变, 但从总体来看, 石英样品配分曲线与岩体和黄铁矿大体一致, 表明物质来源可能还是主要由岩浆热液提供。

因此, 从稀土元素方面考虑, 表明石英-黄铜矿阶段成矿物质与矿区侵入的岩体有关, 可能有少量围岩物质的混入。

#### 4.4 流体包裹体证据

流体包裹体是晶格缺陷导致流体包裹于矿物中所形成, 是唯一可用来对地质过程中流体作用进行直接观察的窗口, 历来是地质流体最重要的研究手段之一。一般而言, 通过对流体包裹体的研究, 一方面可以对矿床类型的划分及成矿流体成分、温度和压力的研究起到重要的作用<sup>[25]</sup>; 另一方面能够很好地指示流体成矿的全过程, 继而在一定程度上揭示成矿物质的来源<sup>[26-27]</sup>。

曹勇华等<sup>[8]</sup>对德合龙洼矿区流体包裹体进行了系统研究, 认为矿区存在 3 种不同性质的成矿流体: 超高压高盐度岩浆热液流体 A、中高盐度沸腾流体 B 和中低盐度混合流体 C。流体 A 是一种富含  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  等组分、高温高压高盐度的岩浆期后热水溶液, 具超高压特点; 流体 B 是早期流体 A 减压沸腾并有少量地下水混合形成的  $\text{NaCl}$  不饱和流体; 流体 C 为地下水进一步加入并抑制沸腾形成的中高温、中低盐度和低密度的  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{KCl}$  流体。据此, 本文作者得出矿区成矿流体应主要来源于岩浆, 后期的不断演化及混合, 形成各不同类型的成矿流体这一结论。该结论在一定程度上表明矿区成矿物质应主要来源于深部的岩浆, 因流体 C 有地下水混入, 故不排除可能有少量地层成矿物质加入。

## 5 结论

1) 矿区 14 件硫化物(毒砂、黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿)样品的  $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$  值分布范围较宽。样品的  $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$  值与成矿体系平衡条件下的硫化物中  $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$  的富集顺序基本一致, 表明在金属硫化物沉淀过程中硫同位素分配已近乎达到平衡。经分析, 矿区硫源主要来自于矿区中酸性侵入岩。

2) 矿区各不同矿石铅同位素比值较为稳定, 变化范围较小, 基本显示为正常铅的特征。在卡农三角图解中, 各散点均落入卡农铅同位素演化图的正常铅小三角形中, 并且非常接近正常铅演化曲线, 亦表明矿石铅为不含放射性成因铅的普通铅。通过总结特征参数示踪、铅构造模式示踪及  $\Delta\beta-\Delta\gamma$  图解示踪等几方面分析结果, 可知德合龙洼铜金矿床矿石铅主要为地壳与地幔混合的俯冲铅, 主要成矿物质应来源于俯冲造山背景下形成的岩浆侵入体。

3) 流体包裹体及稀土元素地球化学特征均表明矿区成矿物质可能主要来源于岩浆侵入体, 少许成矿物质可能来源于周围地层。

4) 矿区硫和铅同位素组合特征、流体包裹体以及稀土元素地球化学特征共同指示成矿物质主要来源于深部岩浆。这种岩浆的形成可能与板片俯冲造山有关,地壳与地幔组分均可提供成矿物质来源。

## REFERENCES

- [1] 芮宗瑶, 黄崇轲, 齐国明, 徐珏, 张洪涛. 中国斑岩铜(钼)矿[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-350.  
RUI Zong-yao, HUANG Chong-ke, QI Guo-ming, XU Jue, ZHANG Hong-tao. China porphyry copper (molybdenum) deposit [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-350.
- [2] 魏菊英, 王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-166.  
WEI Ju-ying, WANG Guan-yu. Isotopic geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-166.
- [3] 肖晓, 汤井田, 息朝庄, 王焯, 张继峰, 杜华坤. 青海德合龙洼铜金矿区次生晕特征及其指示意义[J]. 金属矿山, 2009, 39(2): 105-117.  
XIAO Xiao, TANG Jing-tian, XI Chao-zhuang, WANG Ye, ZHANG Ji-feng, DU Hua-kun. Characteristics and indication significance of the secondary halo in Dehelongwa Cu-Au deposit in Qinghai [J]. Metal Mine, 2009, 39(2): 105-117.
- [4] 张涛. 青海双朋西一斜长支沟地区金矿成矿地质条件及成矿规律[J]. 西北地质, 2007, 40(3): 62-67.  
ZHANG Tao. Ore-forming conditions and metallogeny of gold deposits in Shuangpengxi—Xiechanggou, Qinghai Province [J]. Northwestern Geology, 2007, 40(3): 62-67.
- [5] 息朝庄. 青海同仁双朋西矿区地质地球化学特征及成矿预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 1-121.  
XI Chao-zhuang. Research on the geological-geochemical characteristics and metallogenic prognosis in the Shuangpengxi deposit area, Tongren, Qinghai Province [D]. Changsha: Central South University, 2009: 1-121.
- [6] 傅晓明, 息朝庄. 青海德合龙洼铜矿床地质地球化学特征[J]. 地质找矿论丛, 2010, 25(2): 124-140.  
FU Xiao-ming, XI Chao-zhuang. Geological and geochemical characteristics of Dehelongwa gold-copper deposit in Qinghai [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2010, 25(2): 124-140.
- [7] 刘旭, 戴塔根, 姜克林, 息朝庄, 刘悟辉, 谢剑锋. 青海德合龙洼铜金矿地质特征及找矿标志[J]. 国土资源导刊, 2009, 4: 68-69.  
LIU Xu, DAI Ta-gen, JIANG Ke-lin, XI Chao-zhuang, LIU Wu-hui, XIE Jian-feng. Metallogeny and prospecting indicators of Dehelongwa copper gold deposit [J]. Land & Resources Herald, 2009, 4: 68-69.
- [8] 曹勇华, 赖健清, 康亚龙, 樊俊昌. 青海德合龙洼铜(金)矿流体包裹体特征及成矿作用分析[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 147-158.  
CAO Yong-hua, LAI Jian-qing, KANG Ya-long, FAN Jun-chang. Characteristics of fluid and mineralization of the Dehelongwa copper(gold) deposit, Qinghai [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 147-158.
- [9] 陕亮, 郑有业, 徐荣科, 曹亮, 张雨莲, 连永牢, 李华. 硫同位素示踪与热液成矿作用研究[J]. 地质与资源, 2009, 18(3): 197-203.  
SHAN Liang, ZHENG You-ye, XU Rong-ke, CAO Liang, ZHANG Yu-lian, LIAN Yong-lao, LI Hua. Review on sulfur isotopic tracing and hydrothermal metallogenesis [J]. Geology and Resources, 2009, 18(3): 197-203.
- [10] FATURE G, MENSING T M. Isotopes: Principles and applications [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2005: 256-283.
- [11] 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.
- [12] DOE B R, STACEY J S. The application of lead isotopes of the problem of ore genesis and ore prospect evolution [J]. Econ Geol, 1974, 69(6): 757-776.
- [13] 杨勇, 罗泰义, 黄智龙, 杨竹森, 田世洪, 钱志宽. 西藏纳如松多银铅矿 S、Pb 同位素组成: 对成矿物质来源的指示[J]. 矿物学报, 2010, 30(3): 311-318.  
YANG Yong, LUO Tai-yi, HUANG Zhi-long, YANG Zhu-sen, TIAN Shi-hong, QIAN Zhi-kuan. Sulfur and lead compositions of the Narusonggou silver zinc-lead deposit in Tibet: Implications for the sources of plutons and metals in the deposit [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2010, 30(3): 311-318.
- [14] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 218-232.  
ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. Stable isotope geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2000: 218-232.
- [15] 韩吟文, 马振东. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 225-230.  
HAN Ying-wen, MA Zhen-dong. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 225-230.
- [16] 徐文欣. 我国锡矿床的同位素地球化学研究[J]. 矿产与地质, 1995, 45(1): 1-11.  
XU Wen-xin. Isotope geochemistry of tin deposit in our country [J]. Mineral Resources and Geology, 1995, 45(1): 1-11.
- [17] 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 唐菊兴, 钟康惠, 刘晓吉. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S、Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 52-58.  
WANG Li-qiang, GU Xue-xiang, CHENG Wen-bin, TANG Ju-xing, ZHONG Kang-hui, LIU Xiao-ji. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the sources of ore-forming materials in the Mengya'a Pb-Zn deposit, Tibet [J]. Geoscience, 2010,

- 24(1): 52–58.
- [18] 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 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): 73–79.  
WU Kai-xing, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang, TANG Qun-li. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A review [J]. *Geology-Geochemistry*, 2002, 30(3): 73–79.
- [19] ZARTMAN R E, DOE B R. Plumbotectonics—The model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1/2): 135–162.
- [20] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟. 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.
- [21] 郑明华, 张寿庭, 刘家军. 西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 84–89.  
ZHENG Ming-hua, ZHANG Shou-ting, LIU Jia-jun. Geological background and metallogenic mechanism of the muruntau-type gold deposits in southwestern Tianshan mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001: 84–89.
- [22] 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: 340–347.  
CHEN Guo-da. Diwa theory—Outline on activated tectonics and metallogenic theoretic system [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1996: 340–347.
- [23] 曹勇华. 青海同仁德合龙洼铜金矿成矿流体特征及成矿作用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 1–67.  
CAO Yong-hua. The characteristics of ore-forming fluids and mineralization of Dehelongwa copper deposit, Tongren, Qinghai Province [D]. Changsha: Central South University, 2011: 1–67.
- [24] 毕献武, 胡瑞宗, 彭建堂, 吴开兴. 黄铁矿微量元素地球化学特征及其对成矿流体性质的指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(1): 1–4.  
BI Xian-wu, HU Rui-zhong, PENG Jian-tang, WU Kai-xin. REE and HFSE geochemical characteristics of pyrites in Yao'an gold deposit: Tracing ore forming fluid signatures [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2004, 23(1): 1–4.
- [25] 池国祥, 赖健清. 流体包裹体在矿床研究中的作用[J]. 矿床地质, 2009, 28(6): 850–855.  
CHI Guo-xiang, LAI Jian-qing. Roles of fluid inclusions in study of mineral deposits [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(6): 850–855.
- [26] 范宏瑞, 金成伟, 沈远超. 新疆哈图金矿成矿流体地球化学[J]. 矿床地质, 1998, 17(2): 135–149.  
FAN Hong-rui, JIN Cheng-wei, SHEN Yuan-chao. Ore-forming fluid geochemistry of the Hatu gold deposit in Xinjiang, Northwest China [J]. *Mineral Deposits*, 1998, 17(2): 135–149.
- [27] 李晓峰, 陈振宇, 王汝成, 王平安, 朱和平. 江苏东海水晶矿床成因初探: 流体包裹体和硅氧同位素证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(7): 2018–2028.  
LI Xiao-feng, CHEN Zhen-yu, WANG Ru-cheng, WANG Ping-an, ZHU He-ping. Preliminary study on the genesis of rocked quartz in Donghai, Jiangsu Province: Evidence from fluid inclusions and Si, O isotope [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(7): 2018–2028.

(编辑 陈卫萍)