

# 黄铁矿稀土元素和微量元素地球化学特征： 对东准噶尔绿源金矿成矿流体的约束

元强<sup>1</sup>, 葛文胜<sup>1\*</sup>, 丁辉<sup>1</sup>, 陈疆<sup>2</sup>, 贾红旭<sup>2</sup>, 黄钢<sup>1</sup>, 张佳儒<sup>2</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;  
2. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 新疆 哈密 839000

**摘要:** 为探讨东准噶尔绿源金矿成矿流体性质及其演化特征, 以矿床中的载金黄铁矿为研究对象, 运用 ICP-MS 方法, 研究了黄铁矿中的稀土元素和微量元素地球化学特征。结果显示, 黄铁矿具有轻重稀土分馏较明显、轻稀土元素富集的右倾配分模式, 其 Hf/Sm、Th/La 和 Nb/La 值均小于 1; 富集 Cu、Pb、Zn、Cd、Sb 等亲硫元素, 具有较弱的 Ce 负异常。上述特征表明, 成矿过程的物理化学条件为还原环境, 成矿 I、II 阶段流体的温度低, 成矿 III 阶段可能混入外来热液, 导致流体温度升高。黄铁矿的 Y/Ho 值、Zr/Hf 值和 Nb/Ta 值较大的变化范围表明成矿热液以早期流体为主, 并可能与弧后盆地关系密切。

**关键词:** 黄铁矿; 稀土元素; 微量元素; 成矿流体; 绿源金矿; 东准噶尔

中图分类号: P578.2<sup>92</sup> 文章编号: 1007-2802(2017)04-0628-09 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.04.015

## Geochemical Characteristics of REE and Trace Elements of Pyrite: Constraint on the Ore-Forming Fluid of the Lvyuan Gold Deposit, Eastern Junggar

YUAN Qiang<sup>1</sup>, GE Wen-sheng<sup>1\*</sup>, DING Hui<sup>1</sup>, CHEN Jiang<sup>2</sup>,  
JIA Hong-xu<sup>2</sup>, HUANG Gang<sup>1</sup>, ZHANG Jia-ru<sup>2</sup>

1. School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. No. 6 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Hami Xinjiang 839000, China

**Abstract:** Geochemical characteristics of REE and trace elements of the gold-bearing pyrite were studied by applying ICP-MS method to discuss properties and evolution characteristics of the ore-forming fluid in the Lvyuan gold deposit, eastern Junggar. Results show that the pyrite has right-declined REE distribution patterns, with relatively obvious LREE/HREE fractionation and LREE enrichment. Its Hf/Sm, Th/La and Nb/La values are all lower than 1. These indicate that the ore-forming fluid is enriched in Cl<sup>-</sup>. In addition, pyrite also has enriched in chalcophile elements including Cu, Pb, Zn, Cd and Sb. The weak Ce anomaly of its REE patterns indicates that the Au mineralization occurred in the reduced environment. The variation characteristics of  $\delta\text{Eu}$  and Co/Ni values of Stage I, II, III pyrites indicate that temperatures of ore-forming fluids in Stage I and II are relatively low, while the temperature of the ore-forming fluid in Stage III is relatively high, probably due to the mixing of external hydrothermal fluid. The wide ranges of Y/Ho, Zr/Hf and Nb/Ta values of pyrites indicate that the Au mineralization occurred mostly in the early stage ore-forming fluid which could be closely related to the back-arc basin.

**Key words:** pyrite; rare earth element; trace element; ore-forming fluid; Lvyuan gold deposit; eastern Junggar

谢米斯台-野马泉-琼河坝古生代岩浆岛弧带是 中亚造山带的重要岛弧带之一(肖文交等, 2006; Xiao *et al.*, 2009), 其南为卡拉麦里蛇绿岩带, 北为阿尔曼太蛇绿岩带。琼河坝矿集区位于该岛弧带

收稿日期: 2016-11-09 收到, 2016-12-21 改回

基金项目: 新疆地质矿产勘查开发局项目(DZKC201504-009)

第一作者简介: 元强(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿产普查与勘探. E-mail: yqiang6@163.com.

\* 通讯作者简介: 葛文胜(1968-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 矿床学与矿床地球化学. E-mail: gews@cugb.edu.cn.

东段,近年来已发现矿床有淖毛湖北山金矿、蒙西铜矿、和尔赛铜矿(董连慧,2009)等,显示出该矿集区具有丰富矿产资源。但总体上琼河坝矿集区研究程度仍较低。前人对矿集区大地构造背景、岩浆活动时限,对区内典型矿床蒙西铜矿、和尔赛铜矿的成矿地质背景、矿床地质地球化学特征、成矿时代及矿床成因等作了一些研究(陈仁义等,1995;刘家远等,2002;刘德权等,2005;朱志新等,2005;郝建荣,2006;王晓地等,2006;陈毓川等,2007;赵霞等,2008;王登红等,2009;屈迅等,2009;张永等,2010;程松林等,2010;杜世俊等,2010;张峰等,2014;王瑞美,2014)。黄铁矿是金矿床中最普遍也是最重要的载金矿物(要梅娟等,2008),不同物理化学环境下形成的黄铁矿,其晶体形态、微量元素等有一定的差异(陈光远等,1987; Reich *et al.*, 2005)。稀土元素在低级变质作用、风化作用和热液蚀变作用中相对不活泼,可作为水-岩作用及成矿流体的示踪剂(Rollinson, 1993)。黄铁矿中微量元素的含量受成矿流体的微量元素含量制约(Moh, 1980)。前人研究发现黄铁矿内存在流体包裹体,包裹体内溶液的稀土元素特征可以反映成矿流体特征(赵葵东,2005; Mao *et al.*, 2009)。因此研究不同成矿阶段黄铁矿稀土微量元素可以反映成矿流体的性质及演化特征。

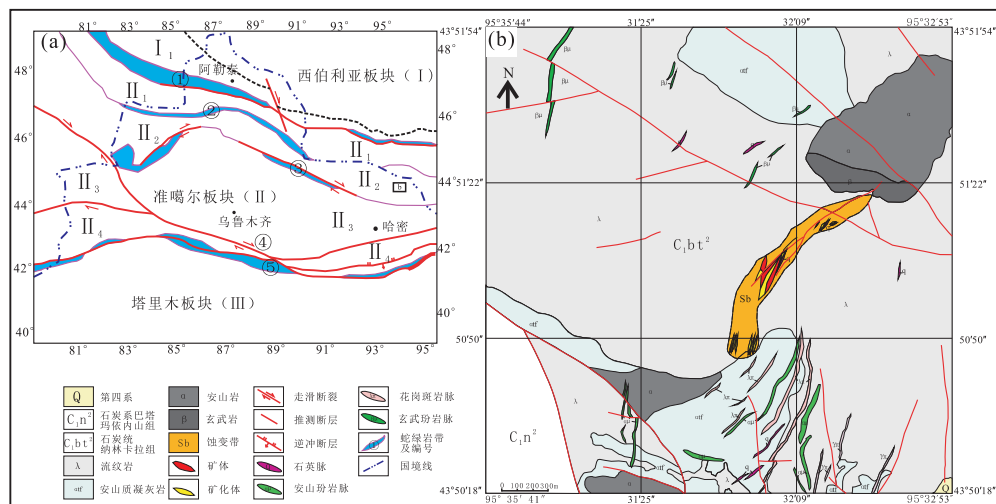
绿源金矿是琼河坝矿集区内首次发现的浅成低温热液型金矿。矿床位于新疆维吾尔自治区伊

吾县淖毛湖镇东北方向。该矿床是由新疆地矿局第六地质大队于2007~2009年在和尔赛一带开展1:5万区域地质矿产调查,同时进行1:5万岩屑面积测量的工作基础上,后经对绿源一带作1:1万岩屑测量时发现,于2014年开始预普查工作,金平均品位2.84 g/t。然而有关该矿床的研究少有。黄铁矿是矿床的主要载金矿物,本文在绿源金矿野外地质特征观察、手标本和镜下鉴定基础上,划分出成矿阶段,用ICP-MS分析不同成矿阶段黄铁矿的稀土元素和微量元素特征,来探讨成矿流体性质及演化特征,以期为绿源金矿乃至琼河坝矿集区成矿流体演化研究提供资料。

## 1 区域与矿区地质

绿源金矿位于新疆准噶尔盆地东北部,区域构造上属于谢米斯台-野马泉-琼河坝岛弧带东段(图1a)。谢米斯台-野马泉-琼河坝岛弧带介于阿尔曼台蛇绿岩带与卡拉麦里绿岩带之间(董连慧等,2009)。区域内出露地层主要有中-上奥陶统荒草坡群( $O_{2-3}hcq$ )、下泥盆统托让格库都克组( $D_1t$ )、下石炭统那林卡拉组( $C_1n$ )、下石炭统巴塔玛依内山组( $C_1bt$ )、下二叠统别勒库都克组( $P_1b$ )、中侏罗统水西沟群西山窑组( $J_2x$ )及第四系。区域岩浆岩主要为古生代侵入岩,主要为中酸性花岗闪长岩、二长花岗岩与钾长花岗岩岩体等。

矿区内出露地层有下石炭统那林卡拉组



(a) 蛇绿岩带: ①乔夏哈拉-布尔根蛇绿岩带; ②阿尔曼台-扎河坝-洪古勒楞-塔城蛇绿岩带; ③卡拉麦里-达拉布特/克拉玛依-唐巴勒蛇绿岩带; ④冰达坂-干沟-却勒塔格蛇绿岩带; ⑤长阿吾子-那拉提-古洛沟-库米什-红河蛇绿岩带。大地构造单元划分: I - 西伯利亚板块; I<sub>1</sub>-阿尔泰山南缘古生代弧盆系统; II - 准噶尔板块: II<sub>1</sub>-萨吾尔山晚古生代大洋岛弧, II<sub>2</sub>-谢米斯台-库兰卡孜干-纸房-琼河坝古生代岛弧; II<sub>3</sub>-准噶尔-吐哈地块; II<sub>4</sub>-天山地区古生代复合弧盆系统; III - 塔里木板块。图 a 中的 b 示绿源金矿位置; 图(a)据董连慧等(2009)

图 1 绿源金矿大地构造位置(a)与矿区地质简图(b)

Fig.1 Tectonic sketch(a) and ore geological map(b) of the LvYuan gold deposit

( $C_1n$ )、下石炭统巴塔玛依内山组( $C_1bt$ )和第四系覆盖物(图 1b)。其中,巴塔玛依内山组出露广泛,为矿区主要赋矿地层,岩性为一套基性-酸性火山熔岩及火山碎屑岩系。火山熔岩中包括了玄武岩、安山岩、流纹岩及安山质凝灰岩等。矿区内断裂发育,断裂主要以北西向为主、次为东向的小断裂,金矿体多位于小断裂中。矿区内侵入岩主要发育少量脉岩:花岗斑岩脉、灰绿玢岩脉和石英脉等。

矿体形态主要为脉状和似脉状。矿体主要呈北东向于矿区中部的蚀变带中展布,组合状态主要为细网脉状,矿体交叉、断续和歼灭现象普遍。矿石类型主要为石英脉型和蚀变岩型矿石。矿石矿物简单,金主要以晶格金形式赋存于载金矿物中;除金外,还包括黄铁矿、毒砂、黄铜矿、闪锌矿、黝铜矿等。脉石矿物主要有石英、玉髓、绢云母、方解石、绿泥石等。围岩蚀变主要有硅化、绢云母化、高岭土化、绿泥石化、碳酸盐化等。

野外地质现象观察、手标本及镜下鉴定可将绿源金矿成矿期划分为 4 个阶段:黄铁矿-石英阶段(I)、石英-黄铁矿阶段(II)、石英-多金属硫化物阶段(III)及石英-碳酸盐阶段(IV)。

黄铁矿-石英阶段(I)为成矿早阶段。该阶段金矿化较弱,主要矿物为石英、少量黄铁矿。黄铁矿主要为破碎团块状,部分发生溶蚀(图 2a、2b),浸染状分布于乳白色石英脉(图 2c)中。石英-黄铁矿阶段(II)为成矿主阶段。该阶段金矿化较强,主要矿物为黄铁矿、石英。黄铁矿较第 I 阶段显著增加,自形、半自形,形态包括立方体、五角十二面体及其之间的聚形晶(图 2d、2e),粒径小于 0.05 mm,颜色主要为铜黄色,主要是沿着烟灰色石英脉(图 2f)呈浸染状或细脉状产出。

石英-多金属硫化物阶段(III)为成矿主阶段。该阶段金矿化较强,金属硫化物显著增加,可见黄铁矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿和黝铜矿等共生。黄铁矿偏白色,自形-半自形,以立方体为主;黄铜矿与黝铜矿、黄铁矿、闪锌矿密切共生(图 2g、2h、2j);石英脉主要为灰黑色(图 2i)。

石英-碳酸盐阶段(IV)为成矿末阶段。该阶段金矿化微弱,石英主要为灰白色;碳酸盐矿物主要为方解石,穿切前阶段形成石英脉(图 2k、2l);黄铁矿显著减少,呈零星状分布,部分呈薄膜状分布。

## 2 样品采集及分析方法

绿源金矿目前处于普查阶段,本次研究系统采

集了与金矿化关系密切的 I、II、III 成矿阶段的石英脉型及蚀变岩型矿石钻孔岩心样品 20 件。样品经过粉碎、过筛后,在双目镜下挑选 60~80 目、纯度大于 99% 的黄铁矿单矿物样品。优选出 13 件黄铁矿单矿物样品,用于黄铁矿微量元素、稀土元素分析,包括 I 阶段(3 件)、II 阶段(8 件)、III 阶段(2 件)。样品由核工业北京地质研究院分析测试中心进行黄铁矿单矿物 44 项微量元素测试。测试仪器为 NexION 300D 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS);测试方法依据国家标准 GB/T 14506.30-2010;分析温度 22℃,相对湿度 19%,各元素检出限为  $0.002 \times 10^{-6}$ 。

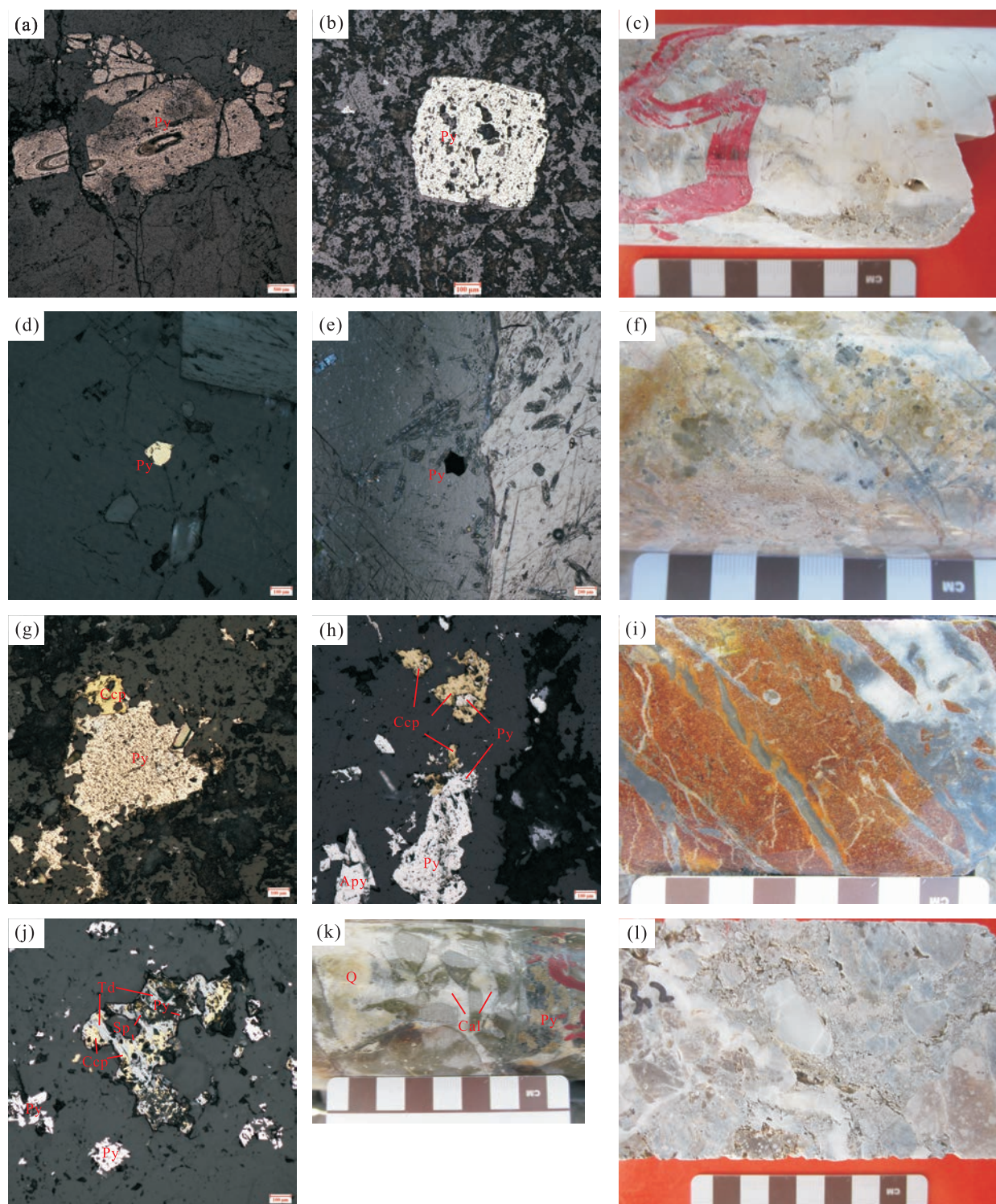
## 3 分析结果

### 3.1 稀土元素特征

黄铁矿稀土元素测定结果如表 1 所示。采用 CI 球粒陨石标准(Sun and McDonough, 2010)对测定结果进行标准化得到结果如图 3。与金矿关系密切的 3 个成矿阶段黄铁矿稀土元素均表现为轻重稀土分馏明显、轻稀土富集的右倾型配分模式。I 阶段黄铁矿具有较高  $\Sigma\text{REE}$  含量,达到  $291.88 \times 10^{-6} \sim 455.20 \times 10^{-6}$ ,且强烈富集轻稀土, $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  值为 8.27~40.57,具有较强的 Eu 负异常,其  $\delta\text{Eu}$  值为 0.44~0.48,较弱铈异常( $\delta\text{Ce} = 0.96 \sim 1.01$ );II 阶段黄铁矿  $\Sigma\text{REE}$  为  $57.89 \times 10^{-6} \sim 164.74 \times 10^{-6}$ ,富集轻稀土元素, $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  为 5.38~11.25, $\delta\text{Eu}$  为 0.39~0.57,无明显铈异常;III 阶段黄铁矿的  $\Sigma\text{REE}$  为  $31.00 \times 10^{-6} \sim 32.40 \times 10^{-6}$ ,轻稀土元素强烈富集, $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  值为 8.27~10.53, Eu 负异常( $\delta\text{Eu} = 0.51 \sim 0.86$ ),弱铈异常( $\delta\text{Ce} = 0.94 \sim 0.97$ )。从早期阶段到晚期阶段,黄铁矿的稀土总量明显降低。

### 3.2 微量元素特征

黄铁矿微量元素测定结果如表 2 所示,选取大陆地壳标准(Gao *et al.*, 1998)对微量元素含量进行标准化,结果见图 4。绿源金矿黄铁矿总体上富集 Cu、Pb、Zn、Cd、Sb 等元素;相对富集 Th、U、Ta、Nb、Zr、Hf 等高场强元素;大离子亲石元素 Sr、Ba、Cs、Rb 等元素相对亏损。I 成矿阶段更富集高场强元素,II、III 阶段 Ta、Nb 等元素富集不明显。各成矿阶段黄铁矿的 Hf/Sm、Th/La 和 Nb/La 值均小于 1。I 阶段黄铁矿的 Y/Ho 值为 23.6~24.9, Nb/Ta 值为 23.3~47.3, Zr/Hf 值为 30.8~41.6;II 阶段黄铁矿的 Y/Ho 值为 26.0~29.5, Nb/Ta 值为 13.8~21.7, Zr/Hf 值为 34.0~42.6;III 阶段黄铁矿的 Y/Ho 值为 27.8~27.9, Nb/Ta 值为 14.7~15.6, Zr/Hf 值为



(a) 黄铁矿破碎 (I 阶段); (b) 黄铁矿溶蚀 (I 阶段); (c) 乳白色石英脉 (I 阶段); (d) 五角十二面体黄铁矿 (II 阶段); (e) 立方体聚形晶 (正交) (II 阶段); (f) 烟灰色石英脉穿切乳白色石英脉 (II 阶段); (g) 黄铁矿与黄铜矿共生 (III 阶段); (h) 黄铁矿、黄铜矿与毒砂共生 (III 阶段); (i) 灰黑色石英脉穿切乳白色、烟灰色石英脉; (j) 黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、锑黝铜矿与毒砂共生 (III 阶段); (k) 方解石、石英与黄铁矿共生 (IV 阶段); (l) 灰白色石英脉 (IV 阶段)。Apy-毒砂; Cal-方解石; Ccp-黄铜矿; Py-黄铁矿; Q-石英; Sp-闪锌矿; Td-锑黝铜矿

图2 绿源金矿典型矿物组合及石英脉类型

Fig.2 Typical mineral assemblages and types of quartz veins of the LvYuan gold deposit

33.7~38.5。I 阶段黄铁矿 Co/Ni 值为 0.37~0.71; II 阶段黄铁矿 Co/Ni 值为 0.40~0.89, 个别

样品 Co/Ni 值大于 1 为 5.34; III 阶段黄铁矿 Co/Ni 值 1.42~15.5。

表 1 绿源金矿黄铁矿稀土元素含量及其特征值

| Table 1 REE compositions and parameters of pyrites from the LvYuan gold deposit (×10 <sup>-6</sup> ) |      |      |      |       |      |       |      |      |      |      |        |      |      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|-------|------|-------|------|------|------|------|--------|------|------|
| 样品                                                                                                   | I 阶段 |      |      | II 阶段 |      |       |      |      |      |      | III 阶段 |      |      |
|                                                                                                      | LY01 | LY02 | LY03 | LY04  | LY05 | LY06  | LY07 | LY08 | LY09 | LY10 | LY11   | LY12 | LY13 |
| La                                                                                                   | 89.3 | 61.0 | 49.1 | 29.8  | 13.5 | 28.7  | 14.2 | 24.0 | 18.8 | 19.1 | 10.5   | 6.36 | 5.99 |
| Ce                                                                                                   | 189  | 124  | 113  | 67.3  | 29.7 | 63.0  | 29.2 | 52.5 | 40.0 | 39.2 | 22.2   | 13.2 | 11.8 |
| Pr                                                                                                   | 24.7 | 15.6 | 14.8 | 8.89  | 3.95 | 8.26  | 3.72 | 7.06 | 5.41 | 5.11 | 2.90   | 1.69 | 1.51 |
| Nd                                                                                                   | 99.4 | 62.6 | 61.3 | 36.1  | 16.2 | 34.0  | 14.8 | 28.3 | 22.9 | 20.5 | 11.6   | 6.84 | 6.70 |
| Sm                                                                                                   | 18.5 | 11.2 | 13.8 | 7.13  | 3.44 | 7.03  | 2.85 | 5.54 | 5.11 | 3.88 | 2.33   | 1.30 | 1.31 |
| Eu                                                                                                   | 2.38 | 1.57 | 2.02 | 0.83  | 0.42 | 0.82  | 0.34 | 0.68 | 0.85 | 0.60 | 0.41   | 0.20 | 0.34 |
| Gd                                                                                                   | 13.4 | 8.14 | 11.3 | 5.25  | 2.94 | 5.37  | 2.32 | 4.22 | 4.29 | 2.97 | 1.96   | 1.00 | 1.05 |
| Tb                                                                                                   | 1.92 | 1.09 | 2.20 | 0.82  | 0.50 | 0.90  | 0.40 | 0.68 | 0.84 | 0.49 | 0.37   | 0.15 | 0.17 |
| Dy                                                                                                   | 7.90 | 3.62 | 12.2 | 3.67  | 2.65 | 4.45  | 2.09 | 3.24 | 4.52 | 2.46 | 2.18   | 0.69 | 0.93 |
| Ho                                                                                                   | 1.24 | 0.48 | 2.04 | 0.65  | 0.48 | 0.77  | 0.34 | 0.55 | 0.79 | 0.44 | 0.42   | 0.11 | 0.16 |
| Er                                                                                                   | 3.37 | 1.24 | 5.22 | 1.81  | 1.32 | 2.18  | 0.93 | 1.47 | 2.08 | 1.28 | 1.26   | 0.38 | 0.45 |
| Tm                                                                                                   | 0.48 | 0.15 | 0.68 | 0.29  | 0.22 | 0.32  | 0.13 | 0.22 | 0.30 | 0.21 | 0.19   | 0.05 | 0.06 |
| Yb                                                                                                   | 3.23 | 1.08 | 4.26 | 1.96  | 1.35 | 2.31  | 0.91 | 1.65 | 1.94 | 1.55 | 1.40   | 0.39 | 0.47 |
| Lu                                                                                                   | 0.38 | 0.11 | 0.53 | 0.25  | 0.18 | 0.29  | 0.12 | 0.20 | 0.23 | 0.19 | 0.16   | 0.04 | 0.06 |
| ΣREE                                                                                                 | 455  | 292  | 292  | 165   | 76.8 | 158   | 72.3 | 130  | 108  | 98.0 | 57.9   | 32.4 | 31.0 |
| LREE                                                                                                 | 423  | 276  | 254  | 150   | 67.2 | 142   | 65.1 | 118  | 93.1 | 88.4 | 49.9   | 29.6 | 27.7 |
| HREE                                                                                                 | 31.9 | 15.9 | 38.4 | 14.7  | 9.63 | 16.59 | 7.23 | 12.2 | 15.0 | 9.59 | 7.95   | 2.81 | 3.35 |
| LREE/HREE                                                                                            | 13.3 | 17.3 | 6.61 | 10.2  | 6.98 | 8.55  | 9.01 | 9.66 | 6.21 | 9.22 | 6.29   | 10.5 | 8.27 |
| La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>                                                                     | 19.8 | 40.5 | 8.27 | 10.9  | 7.17 | 8.91  | 11.3 | 10.4 | 6.95 | 8.84 | 5.38   | 11.7 | 9.14 |
| δEu                                                                                                  | 0.44 | 0.48 | 0.48 | 0.39  | 0.39 | 0.39  | 0.40 | 0.42 | 0.54 | 0.52 | 0.57   | 0.51 | 0.86 |
| δCe                                                                                                  | 0.97 | 0.96 | 1.02 | 1.00  | 0.98 | 0.99  | 0.96 | 0.98 | 0.96 | 0.95 | 0.97   | 0.97 | 0.94 |

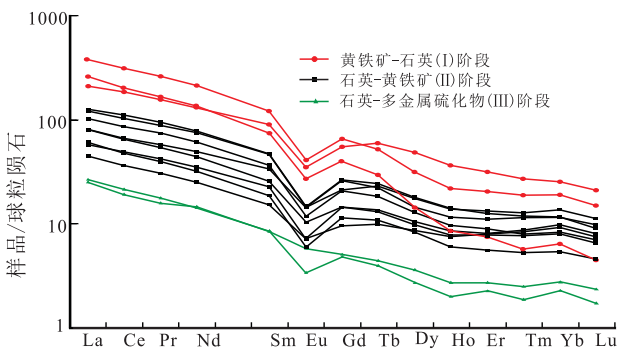


图 3 绿源金矿黄铁矿稀土元素球粒陨石标准化模式图  
Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns of ore-bearing pyrites in the LvYuan gold deposit

4 讨论

4.1 成矿流体的组成

矿物的稀土元素一般受其晶体结构的制约,同时受形成矿物之介质的稀土元素特征的控制。由于REE<sup>3+</sup>的离子半径与Fe<sup>2+</sup>的离子半径相差较大(Shannon,1976),可知黄铁矿的晶体结构对稀土元素影响不大,影响较大的主要是形成矿物时介质中的稀土元素特征。另外,稀土元素属于不活泼元

素,在热液体系中可以十分有效地示踪成矿流体的来源及水-岩相互作用(毛光周等,2006;Wang *et al.*,2012)。对现代海底热液系统的研究表明,硫化物具有与热液流体相似的稀土元素特征(Mills and Elderfield,2012)。因此,黄铁矿的稀土元素特点可以直接反应成矿流体中的稀土元素组成特点和其沉淀时的温度、压力、pH-Eh等物理化学条件的影响(李厚民等,2003)。近年的研究表明,富Cl<sup>-</sup>的和富F<sup>-</sup>的热液都能富集轻稀土元素(毛光周等,2006)。由图3和表1知,绿源金矿各个成矿阶段黄铁矿稀土配分曲线均为右倾且富集轻稀土,表明其成矿流体是富Cl<sup>-</sup>或富F<sup>-</sup>的流体。

HFSE在富Cl<sup>-</sup>和富F<sup>-</sup>的热液中具有明显不同的地球化学行为,富Cl<sup>-</sup>的热液富集LREE,Hf/Sm、Th/La和Nb/La值一般小于1,而富F<sup>-</sup>的热液富集LREE和HFSE,Hf/Sm、Th/La和Nb/La值一般大于1(Oreskes and Einaudi,1990;郑杰等,2010)。HFSE易于与F<sup>-</sup>结合而很难与Cl<sup>-</sup>结合,因此只有F<sup>-</sup>才能同时有效地富集LREE和HFSE(毕献武等,2004;闫国强等,2015)。由表1知绿源金矿各个成矿阶段

表 2 绿源金矿黄铁微量元素含量及特征值

Table 2 Contents and parameters of trace elements of pyrites from the LvYuan gold deposit (×10<sup>-6</sup>)

| 样品    | I 阶段 |      |      | II 阶段 |      |      |      |      |       |      |       | III 阶段 |      | 大陆地壳 |
|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|-------|--------|------|------|
|       | LY01 | LY02 | LY03 | LY04  | LY05 | LY06 | LY07 | LY08 | LY09  | LY10 | LY11  | LY12   | LY13 |      |
| Li    | 0.29 | 0.10 | 0.20 | 0.18  | 0.20 | 0.18 | 0.35 | 0.13 | 0.51  | 0.07 | 0.51  | 0.04   | 0.10 | 17.0 |
| Be    | 0.33 | 0.11 | 0.52 | 0.22  | 0.20 | 0.31 | 0.12 | 0.24 | 0.25  | 0.03 | 0.06  | 0.03   | 0.03 | 1.7  |
| Sc    | 0.36 | 0.13 | 0.92 | 0.47  | 0.26 | 0.40 | 0.12 | 0.37 | 1.20  | 0.13 | 0.16  | 0.06   | 0.17 | 19.0 |
| V     | 0.31 | 0.04 | 0.18 | 0.36  | 0.38 | 0.19 | 0.29 | 0.79 | 0.23  | 0.25 | 0.42  | 0.14   | 0.43 | 128  |
| Cr    | 0.94 | 1.78 | 0.32 | 0.42  | 0.46 | 0.42 | 0.36 | 0.49 | 1.06  | 0.12 | 0.37  | 0.21   | 0.33 | 92.0 |
| Co    | 0.63 | 0.81 | 1.49 | 15.9  | 36.0 | 2.05 | 0.57 | 0.47 | 9.19  | 3.49 | 3.68  | 1.49   | 21.9 | 24.0 |
| Ni    | 1.11 | 2.17 | 2.11 | 39.5  | 52.0 | 3.64 | 0.98 | 0.64 | 12.00 | 3.92 | 0.69  | 1.05   | 1.41 | 46.0 |
| Cu    | 78.6 | 25.0 | 18.4 | 34.6  | 47.6 | 18.5 | 107  | 28.2 | 19.4  | 169  | 23.2  | 17.2   | 11.7 | 38.0 |
| Zn    | 148  | 82.6 | 78.6 | 57.1  | 381  | 63.6 | 127  | 107  | 798   | 23.9 | 345.0 | 25.9   | 47.8 | 81.0 |
| Ga    | 1.20 | 0.86 | 1.33 | 0.74  | 0.55 | 1.12 | 0.68 | 1.03 | 1.78  | 0.38 | 0.51  | 0.34   | 0.44 | 18.0 |
| Rb    | 1.19 | 0.99 | 1.56 | 1.05  | 0.61 | 2.36 | 1.37 | 2.06 | 3.44  | 0.41 | 0.70  | 0.95   | 1.40 | 69.0 |
| Sr    | 1.93 | 0.87 | 1.76 | 2.00  | 1.29 | 3.25 | 0.70 | 1.33 | 2.10  | 0.45 | 0.52  | 0.56   | 0.95 | 285  |
| Y     | 30.6 | 11.4 | 50.7 | 18.6  | 14.0 | 22.0 | 10.0 | 15.4 | 23.0  | 11.5 | 11.3  | 3.17   | 4.33 | 17.5 |
| Mo    | 2.7  | 2.0  | 8.5  | 2.6   | 28.0 | 5.1  | 2.6  | 15.0 | 91.0  | 297  | 534   | 116    | 1.6  | 0.65 |
| Sb    | 68.9 | 347  | 52.3 | 666   | 108  | 33.6 | 157  | 100  | 51.3  | 34.7 | 22.5  | 106    | 97.4 | 0.2  |
| Cs    | 0.07 | 0.08 | 0.06 | 0.06  | 0.03 | 0.21 | 0.05 | 0.20 | 0.26  | 0.02 | 0.04  | 0.31   | 0.05 | 2.8  |
| Ba    | 4.95 | 2.54 | 5.47 | 2.71  | 2.78 | 2.85 | 2.96 | 3.22 | 8.07  | 1.38 | 4.05  | 3.08   | 4.57 | 614  |
| W     | 4.01 | 0.74 | 1.01 | 0.39  | 0.87 | 0.46 | 0.17 | 3.12 | 1.00  | 3.31 | 1.61  | 0.52   | 0.20 | 0.7  |
| Cd    | 0.23 | 0.23 | 0.14 | 0.09  | 0.68 | 0.11 | 0.07 | 0.17 | 1.33  | 0.40 | 1.03  | 0.18   | 0.05 | 0.08 |
| Pb    | 200  | 304  | 312  | 670   | 379  | 449  | 238  | 474  | 328   | 138  | 108   | 119    | 56.9 | 15.0 |
| Bi    | 0.34 | 0.78 | 3.92 | 3.27  | 4.90 | 2.68 | 1.56 | 1.21 | 1.15  | 0.07 | 0.10  | 0.18   | 0.26 | 0.3  |
| Th    | 4.05 | 2.01 | 4.14 | 2.28  | 1.64 | 2.42 | 0.81 | 1.43 | 1.50  | 1.70 | 1.55  | 0.59   | 0.60 | 7.1  |
| U     | 1.26 | 1.25 | 2.26 | 1.54  | 1.00 | 9.15 | 2.93 | 7.50 | 11.00 | 4.25 | 1.38  | 1.41   | 13.4 | 1.2  |
| Nb    | 15.0 | 1.54 | 9.42 | 1.87  | 1.13 | 2.91 | 0.40 | 3.50 | 3.02  | 1.30 | 3.59  | 0.33   | 0.09 | 11.0 |
| Ta    | 0.64 | 0.07 | 0.20 | 0.10  | 0.08 | 0.15 | 0.03 | 0.16 | 0.15  | 0.08 | 0.18  | 0.02   | 0.01 | 0.6  |
| Zr    | 149  | 47.4 | 135  | 115   | 73.6 | 114  | 27.8 | 81.7 | 58.1  | 84.6 | 67.6  | 19.0   | 24.7 | 175  |
| Hf    | 3.58 | 1.26 | 4.39 | 2.70  | 2.02 | 2.74 | 0.79 | 2.17 | 1.50  | 2.43 | 1.99  | 0.56   | 0.64 | 4.71 |
| Sm    | 18.5 | 11.2 | 13.8 | 7.13  | 3.44 | 7.03 | 2.85 | 5.54 | 5.11  | 3.88 | 2.33  | 1.30   | 1.31 | 4.84 |
| La    | 89.3 | 61.0 | 49.1 | 29.8  | 13.5 | 28.7 | 14.2 | 24.0 | 18.8  | 19.1 | 10.5  | 6.36   | 5.99 | 31.6 |
| Ho    | 1.24 | 0.48 | 2.04 | 0.65  | 0.48 | 0.77 | 0.34 | 0.55 | 0.79  | 0.44 | 0.42  | 0.11   | 0.16 | \    |
| Co/Ni | 0.56 | 0.37 | 0.71 | 0.40  | 0.69 | 0.56 | 0.58 | 0.74 | 0.77  | 0.89 | 5.35  | 1.42   | 15.5 | \    |
| Hf/m  | 0.19 | 0.11 | 0.32 | 0.38  | 0.59 | 0.39 | 0.28 | 0.39 | 0.29  | 0.63 | 0.85  | 0.43   | 0.49 | \    |
| Th/La | 0.05 | 0.03 | 0.08 | 0.08  | 0.12 | 0.08 | 0.06 | 0.06 | 0.08  | 0.09 | 0.15  | 0.09   | 0.10 | \    |
| Nb/La | 0.17 | 0.03 | 0.19 | 0.06  | 0.08 | 0.10 | 0.03 | 0.15 | 0.16  | 0.07 | 0.34  | 0.05   | 0.01 | \    |
| Y/Ho  | 24.7 | 23.6 | 24.9 | 28.4  | 29.4 | 28.5 | 29.5 | 28.2 | 29.1  | 26.0 | 26.8  | 27.8   | 27.9 | \    |
| Zr/Hf | 41.6 | 37.6 | 30.8 | 42.6  | 36.4 | 41.6 | 35.0 | 37.6 | 38.7  | 34.8 | 34.0  | 33.7   | 38.5 | \    |
| Nb/Ta | 23.3 | 23.7 | 47.3 | 18.2  | 14.1 | 19.3 | 13.8 | 21.7 | 20.7  | 16.7 | 20.5  | 15.6   | 14.7 | \    |

黄铁矿 Hf/Sm、Th/La 和 Nb/La 值均小于 1,即亏损 HFSE,表明成矿流体为富 Cl<sup>-</sup> 的流体。

绿源金矿黄铁矿各成矿阶段富集 Cu、Pb、Zn、Cd、Sb 等亲硫元素;相对富集 Th、U、Ta、Nb、Zr、Hf 等高场强元素;大离子亲石元素 Sr、Ba、Rb 等元素相对亏损(图 4)。黄铁矿的微量元素特征,表明成

矿流体富集 Cu、Pb、Zn、Cd、Sb 等亲硫元素。通过野外观察、手标本及镜下鉴定,矿石矿物中除黄铁矿外,还包括黄铜矿、闪锌矿和方铅矿等。这与微量元素富集情况相符。

4.2 成矿流体演化

Eu<sup>2+</sup> 易于在高温、还原的热液中存在,导致 Eu

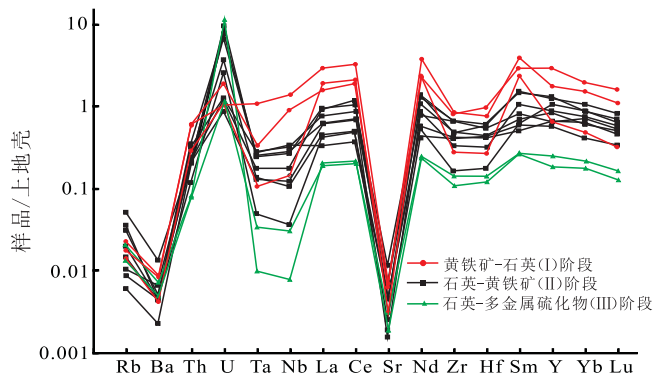


图4 绿源金矿黄铁矿大陆地壳标准化微量元素蛛网图

Fig.4 Continental Crust-normalized trace elements spider diagram of pyrites in the LvYuan gold deposit

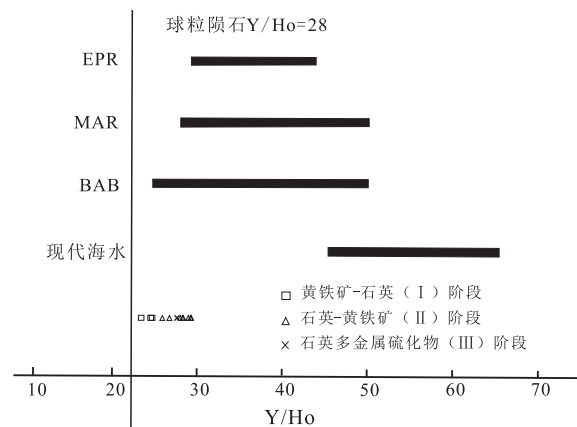
正异常,但不易于在低温还原的热液中存在,导致Eu负异常。氧化条件下, $\text{Ce}^{3+}$ 氧化为 $\text{Ce}^{4+}$ ,与其他元素分离,导致Ce异常(陈炳翰等,2014)。绿源金矿各成矿阶段黄铁矿的 $\delta\text{Ce}$ 值变化范围较小(0.94~1.02),异常不明显,表明绿源金矿成矿物理化学条件为还原环境,这也符合绿源金矿主要载金矿物黄铁矿 $\text{Fe}^{2+}$ 的事实。绿源金矿黄铁矿具有Eu负异常( $\delta\text{Eu}$ 为0.39~0.86),其中I、II阶段 $\delta\text{Eu}$ 值较小(0.39~0.57),III阶段 $\delta\text{Eu}$ 为0.51~0.86(均值为0.69)。I、II阶段的 $\delta\text{Eu}$ 值较小,表明成矿流体的温度较低;III阶段 $\delta\text{Eu}$ 值较前两阶段有一定增加,表明III阶段流体温度较I、II阶段更高。这与石英流体包裹体显微测温所得到的均一温度(I、II阶段均一温度为161~303℃,III阶段均一温度为171~332℃)基本一致(作者未发表数据)。因此推断绿源金矿成矿流体在III阶段中可能混入了较高温度的热液。

黄铁矿中的杂质元素Co、Ni等呈类质同象取代Fe,而Co在周期表中的位置离Fe更近,所以Co较Ni更易进入黄铁矿的晶格中,因此黄铁矿中的Co/Ni值对成矿条件具有一定的指示意义(胡瑛等,2009)。可知Co比Ni对温度更敏感,所以可以用Co/Ni来指示矿物的形成温度,一般Co/Ni值越小,矿物的形成温度越低(盛继福等,1999)。绿源金矿I、II阶段黄铁矿Co/Ni值小于1,说明成矿温度较低;III阶段Co/Ni值较大为1.42~15.53,说明成矿温度较高。随着成矿的进行,绿源金矿这种成矿温度由低变高的现象,进一步表明成矿流体在III阶段中可能混入了较高温度的热液。

由表1可知,I阶段黄铁矿的Y/Ho(23.55~24.85)、Nb/Ta(10.62~31.31)和Zr/Hf(30.75~

41.62),II阶段黄铁矿的Y/Ho(26.01~29.50)、Nb/Ta(3.02~18.50)和Zr/Hf(33.97~42.59);III阶段黄铁矿的Y/Ho(27.80~27.94)、Nb/Ta(1.37~6.83)和Zr/Hf(33.69~38.47)。由此可以看出各成矿阶段黄铁矿的Y/Ho、Nb/Ta、Zr/Hf值变化范围较大。通常状况下,Y-Ho、Nb-Ta和Zr-Hf具有两两相近的离子半径和电价,其相互之间的比值在同一热液体系中比较稳定,当热液体系受到干扰变化时,如发生热液活动和交代作用时,这些元素对会发生明显的分异,表现为不同样品之间同一元素对的比值有较大的变化范围(Yaxley,1998)。绿源金矿各成矿阶段黄铁矿的Y/Ho、Nb/Ta、Zr/Hf变化范围较大,表明其各成矿阶段热液体系可能受到干扰变化,发生了交代作用或有外来热液加入,但成矿流体特征仍以早期成矿流体为主。

前人用Y和Ho对成矿流体及现代海底热液进行了研究(Bau and Dulski,1995,1999;Bau *et al.*,1997)。Y和Ho具有相同的价态和离子半径(Shannon,1976),二者常具有相同的地球化学性质。地球上大多数岩浆岩和碎屑沉积物都保持着球粒陨石的Y/Ho值 $28\pm$ (Douville *et al.*,1999)。笔者对绿源金矿各成矿阶段黄铁矿Y/Ho值与现代海底热液进行对比(图5)知,从I阶段到III阶段黄铁矿Y/Ho值与弧后盆地Y/Ho值重叠范围较多,结合绿源金矿所处的大地构造背景为谢米斯台-野马泉-琼河坝岛弧带东段(董连慧等,2009;屈迅等,2009;张永等,2010),但由于缺少成岩成矿时代方面的资料,对于成矿时期矿区是否处于弧后盆地构造背景还难以把握,因此推断成矿流体可能与弧后盆地关系密切。

BAB-弧后盆地;MAR-中大西洋洋脊;EPR-东太平洋洋脊;热液流体数据引自文献Bau and Dulski(1995,1999);Bau *et al.*(1997)图5 绿源金矿中黄铁矿、现代海底热液和海水的Y/Ho值  
Fig.5 Y/Ho ratios of pyrites from the LvYuan gold deposit, and Y/Ho ratios of modern submarine hydrothermal fluids and seawater

## 5 结论

(1) 绿源金矿黄铁矿的成矿流体中富集 LREE, 且  $\text{Hf/Sm}$ 、 $\text{Th/La}$  和  $\text{Nb/La}$  值小于 1, 表明绿源金矿成矿流体为富  $\text{Cl}^-$  型的流体; 富集  $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Cd}$ 、 $\text{Sb}$  等亲硫元素。

(2) 绿源金矿各成矿阶段黄铁矿的  $\delta\text{Ce}$  值变化范围较小, 表明成矿物理化学条件为还原环境; 成矿 I ~ III 阶段  $\delta\text{Eu}$  值及  $\text{Co/Ni}$  值的变化特征表明 I、II 阶段成矿流体温度较低, 可能混入较高温度的热液, III 阶段成矿流体温度变高的演化特征。

(3) 绿源金矿各成矿阶段的  $\text{Y/Ho}$ 、 $\text{Nb/Ta}$ 、 $\text{Zr/Hf}$  变化范围较大, 表明成矿热液体系可能受到干扰, 发生交代作用或外来热液混入, 但成矿流体特征仍以早期成矿流体为主; 成矿流体可能与弧间盆地热液关系密切。

**致谢:** 野外工作得到新疆第六地质大队张子蛟、夏毅工程师的指导; 在论文撰写过程中得到中国地质大学(北京)吴楚博士、裴秋明博士、张志超博士的帮助; 匿名审稿人提出的宝贵意见使文章有较大提高; 在此一并表达衷心感谢!

## 参考文献 (References):

- Bau M, Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contributions to Mineralogy and petrology*, 119(2-3): 213-223
- Bau M, Mdlle P, Dulski P. 1997. Yttrium and lanthanides in eastern Mediterranean seawater and their fractionation during redox-cycling. *Marine Chemistry*, 56(1-2): 123-131
- Bau M, Dulski P. 1999. Comparing yttrium and rare earths in hydrothermal fluids from the Mid-Atlantic Ridge Implications for Y and REE behaviour during near-vent mixing and for the Y/Ho ratio of Proterozoic seawater. *Chemical Geology*, 155(1-2): 77-90
- Douville E, Bienvenu P, Charlou J L, Donval J P, Fouquet Y, Appriou P, Gamo T. 1999. Yttrium and rare earth elements in fluids from various deep-sea hydrothermal systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(5): 627-643
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, Han Y W, Zhao Z D, Hu Y K. 1998. Chemical composition of the continental crustal crust as revealed by studies in east China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959-1975
- Mao G Z, Hua R M, Gao J F, Li W Q, Zhao K D, Long G M, Lu H J. 2009. Existing forms of REE in gold-bearing pyrite of the Jinshan gold deposit, Jiangxi Province, China. *Journal of Rare Earths*, 27(6): 1079-1087
- Mills R A, Elderfield H. 1995. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26°N Mid-Atlantic Ridge. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(17): 3511-3524
- Moh G H. 1980. Ore synthesis, phase equilibria studies and applications. *Neues Jahrbuch für Mineralogie: Abhandlungen*, 139: 114-154
- Oreskes N, Einaudi M T. 1990. Origin of rare earth element-enriched hematite breccias at the Olympic Dam Cu-U-Au-Ag deposit, Roxby Downs, South Australia. *Economic Geology*, 85(1): 1-28
- Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, Palenik C S, Chrysosoulis S L, Ewing R C. 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781-2796
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation. Routledge: Longman Scientific & Technical Limited: 106-107
- Shannon R D. 1976. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*, 32(5): 751-767
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society London, Special Publications*, 42: 313-345
- Wang Q F, Deng J, Zhao J C, Li N, Wan L. 2012. The fractal relationship between orebody tonnage and thickness. *Journal of Geochemical Exploration*, 122: 4-8
- Xiao W J, Windley B F, Yuan C, Sun M, Han C M, Lin S F, Chen H L, Yan Q R, Liu D Y, Qin K Z, Li J L, Sun S. 2009. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altai. *American Journal of Science*, 309(3): 221-270
- Yaxley G M, Green D H, Kamenetsky V. 1998. Carbonatite metasomatism in the Southeastern Australian Lithosphere. *Journal of Petrology*, 39(11-12): 1917-1930
- 毕献武, 胡瑞忠, 彭建堂, 吴开兴. 2004. 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. *矿物岩石地球化学通报*, 23(1): 1-4
- 陈炳翰, 王中亮, 李海林, 李金奎, 李京濂, 王国强. 2014. 胶东台上金矿床成矿流体演化: 载金黄铁矿稀土元素和微量元素组成约束. *岩石学报*, 30(9): 2518-2532
- 陈光远, 孙岱生, 张立, 臧维生, 王健, 鲁安怀. 1987. 黄铁矿成因形态学. *现代地质*, 1(1): 60-76
- 陈仁义, 刘光海, 马文义. 1995. 新疆琼河坝铜矿地质特征及成因机理. *地质与勘探*, 31(1): 26-31
- 陈毓川, 刘德权, 唐延龄, 王登红, 周汝洪, 王金良. 2007. 中国新疆战略性固体矿产大型矿集区研究. 北京: 地质出版社: 156-171
- 程松林, 王世新, 冯京, 谭克彬, 贾红旭, 陈强. 2010. 和尔赛斑岩型铜矿床地质特征及找矿标志. *新疆地质*, 28(3): 254-259
- 董连慧, 徐兴旺, 屈迅, 李光明. 2009. 初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造背景与形成机制. *岩石学报*, 25(4): 713-737
- 杜世俊, 屈迅, 邓刚, 张永, 程松林, 卢鸿飞, 吴琪, 徐兴旺. 2010. 东准噶尔和尔赛斑岩铜矿成矿时代与形成的构造背景. *岩石学报*, 26(10): 2981-2996
- 郝建荣, 周鼎武, 柳益群, 邢秀娟. 2006. 新疆三塘湖盆地二叠纪火山岩岩石地球化学及其构造环境分析. *岩石学报*, 22(1): 189-198
- 胡瑛, 陈慈弘, 董庆吉, 黄庆文. 2009. 贵州锦丰(烂泥沟)金矿床含砷黄铁矿和脉石英及其包裹体的微量元素特征. *高校地质学报*, 15(4): 506-516

李厚民, 沈远超, 毛景文, 刘铁兵, 朱和平. 2003. 石英、黄铁矿及其包裹体的稀土元素特征：以胶东焦家式金矿为例. 岩石学报, 19(2): 267-274

刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2005. 中国新疆铜矿床和镍矿床. 北京：地质出版社：222-244

刘家远, 钱建平, 程志平, 单丹娜. 2002. 新疆东准噶尔陆相火山作用与金铜成矿. 北京：地质出版社：13-19

毛光周, 华仁民, 高剑峰, 赵葵东, 龙光明, 陆慧娟, 姚军明. 2006. 江西金山金矿床含金黄铁矿的稀土元素和微量元素特征. 矿床地质, 25(4): 412-426

屈迅, 徐兴旺, 梁广林, 屈文俊, 杜世俊, 姜能, 吴惠平, 张永, 肖鸿, 董连慧. 2009. 蒙古斑岩型铜钼矿地质地球化学特征及其对东准噶尔琼河坝岩浆岛弧构造属性的制约. 岩石学报, 25(4): 765-776

盛继福, 李岩, 范书义. 1999. 大兴安岭中段铜多金属矿床矿物微量元素研究. 矿床地质, 18(2): 153-160

王登红, 李华芹, 应立娟, 梅玉萍, 初振利. 2009. 新疆伊吾琼河坝地区铜、金成矿时代及其找矿前景. 矿床地质, 28(1): 73-82

王瑞美. 2014. 新疆东准噶尔蒙西铜矿床地球化学特征及矿床成因探讨. 硕士学位论文. 西安：长安大学：57-61

王晓地, 刘德权, 唐延龄, 周汝洪. 2006. 伊吾县琼河坝地区斑岩铜矿成矿地质特征及远景评价. 新疆地质, 24(4): 398-404

肖文交, 韩春明, 袁超, 陈汉林, 孙敏, 林寿发, 厉子龙, 毛启贵, 张继恩, 孙枢, 李继亮. 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用：对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约. 岩石学报, 22(5): 1062-1076

要梅娟, 申俊峰, 李胜荣, 曹烨, 刘秀艳. 2008. 河南嵩县前河金矿黄铁矿的热电性、热爆特征及其与金矿化的关系. 地质通报, 27(5): 649-656

张峰, 徐涛, 范俊杰, 潘爱军, 王斌, 朝银银. 2014. 东准噶尔石炭系巴塔玛依内山组火山岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄及其构造意义. 地球化学, 43(3): 301-316

张永, 梁广林, 屈迅, 杜世俊, 吴琪, 张征峰, 董连慧, 徐兴旺. 2010. 东准噶尔琼河坝岛弧早古生代岩浆活动的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据. 岩石学报, 26(8): 2389-2398

赵葵东. 2005. 华南两类不同成因锡矿床同位素地球化学及成矿机理研究：以广西大厂和湖南芙蓉锡矿为例. 博士学位论文. 南京：南京大学：39-51

赵霞, 贾承造, 张光亚, 卫延召, 赖绍聪, 方向, 张丽君. 2008. 准噶尔盆地陆东-五彩湾地区石炭系中、基性火山岩地球化学及其形成环境. 地学前缘, 15(2): 272-279

郑杰, 余大龙, 杨忠琴. 2010. 黔东八克金矿床毒砂和黄铁矿微量元素地球化学研究. 矿物学报, 30(1): 107-114

朱志新, 李少贞, 李篙龄. 2005. 东准噶尔纸房地区晚石炭世巴塔玛依内山组陆相火山：沉积体系特征. 新疆地质, 23(1): 14-18

闫国强, 丁军, 黄勇, 李光明, 王欣欣, 戴婕, 白景国. 2015. 西藏努日铜钼矿床辉钼矿微量元素、稀土元素地球化学特征：对矿床成矿流体性质的约束. 矿物岩石地球化学通报, 34(3): 564-570

(本文责任编辑：刘莹；英文审校：张兴春)

• 亮点速读 •

最热的地幔柱才能携带具有原始<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 同位素特征的物质

来自热点 (hot spot, 如夏威夷和冰岛) 的火山熔岩往往携带原始的、异常高的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值信号。高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值的物质通常被认为来自于地球深部, 在由地幔柱造成的热点地区, 深部来源的地幔柱将高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 的物质携带到了浅部。这个长期被接受的解释存在的一个问题是：在有些地幔柱存在的热点地区, 火山岩的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值都是低的, 甚至低于源自上地幔的大洋中脊玄武岩 (MORB)。

Jackson M G 等 3 位美国科学家将 38 个热点地区玄武岩的数据进行了详细分析, 他们对比了每个地区最高的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值与该地区的浮力通量 (buoyancy flux) 及 200 km 深度处地震波低速异常之间的关系, 发现：高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值对应于高浮力通量和强低速异常。他们将这些对应关系解释为高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值和低<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值的物质都同时存在于深部地幔, 只有热的地幔柱才能同时携带 2 种物质, 而那

些温度低些的地幔柱则只能携带具有低<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值的物质。这就意味着具有原始的、高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 同位素特征的物质密度很大, 可能存在于下地幔底部, 由于受地幔对流的影响程度小而长期保存了原始地球的信息。这个工作还证实了：不具有高<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 值的洋岛玄武岩也可以源自地幔柱。这些结果为我们认识地幔的化学组成、物理性质和动力学过程提供了新的制约。

[ 以上成果发表在《Nature》上：Jackson M G, Konter J G, Becker T W. 2017. Primordial helium entrained by the hottest mantle plumes. Nature, 452: 340-343 ]

(夏群科 编译)