

# 广东省河台含金剪切带中REE及其它 微量元素的含量和分布特征\*

陈 骏 王鹤年

(南京大学地球科学系, 南京)

**提 要:** 河台含金剪切带中稀土元素(REE)分布特征表明,在剪切过程中REE的活动性与流体/岩石的比例以及流体运移聚集的方式有关。在水/岩比低的深层韧性剪切环境形成的糜棱岩中REE的组成具有继承原岩的特点;在浅层脆性环境以充填方式形成的含金石英脉中REE的含量主要来源于流体;在中浅层过渡环境形成的含金硅质体中REE的分布则受到原岩和流体的共同影响。

微量元素的研究证明了河台金矿的形成经历了三个阶段:①韧性阶段。由变质热液沿剪切带的渗滤扩散形成含Au小于 $1 \times 10^{-6}$ 的糜棱岩;②韧-脆性阶段。因剪切带的张开和流体的充填交代在剪切带内产生含Au  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 的硅质岩或石英脉;③脆性阶段。受各种张性构造控制在剪切带以内或以外形成含Au  $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 的晚期石英脉。

**关键词:** 含金剪切带 含金石英脉 构造地球化学 REE分布型式 成矿模式

稀土元素(REE)在区域变质作用和热液蚀变交代作用过程中的地球化学行为问题受到了人们的普遍重视,研究工作也已取得了很大的进展<sup>[2~4]</sup>。例如,已经发现在蚀变过程中REE的行为主要受原岩和流体中REE的组成以及蚀变矿物容纳REE的能力所支配<sup>[5]</sup>;在低于绿片岩相的区域变质作用和水/岩比低的热变质作用过程中,REE具有不活动的特点<sup>[6]</sup>。相比之下,有关动力变质作用过程中REE活动性的讨论却比较缺乏。

广东省高要县河台金矿是我国南方首次发现的剪切带型金矿床。剪切带中糜棱岩和有关的矿化蚀变岩石十分发育,是研究动力变质成岩成矿作用的理想地区。本文通过对该区变质岩、糜棱岩和各期形成的金矿体中REE和其它微量元素组成和分布特征的研究,讨论在动力变质作用过程中这些元素的地球化学行为,探讨该含金剪切带形成的地球化学过程。

## 1 矿区地质及含金剪切带的特征

河台金矿位于粤西云开加里东隆起区,四会—吴川深大断裂带的西侧,广宁—罗定断裂变质带的中段(图1)。矿区北、中部出露震旦系C组石英二云母片岩、混合岩化云母石英片岩和黑云母变粒岩;南部以宝鸭塘—坑尾断裂(F1)为界,出露奥陶系三尖群绢云母千枚

\* 国家自然科学基金资助项目

第一作者:陈 骏,男,1954年生,教授。从事矿床学、有机地球化学和环境地球化学研究。邮政编码:210008  
1992-4-17 收稿,1993-1-2 修改回。刘浩龙、陶景连编辑

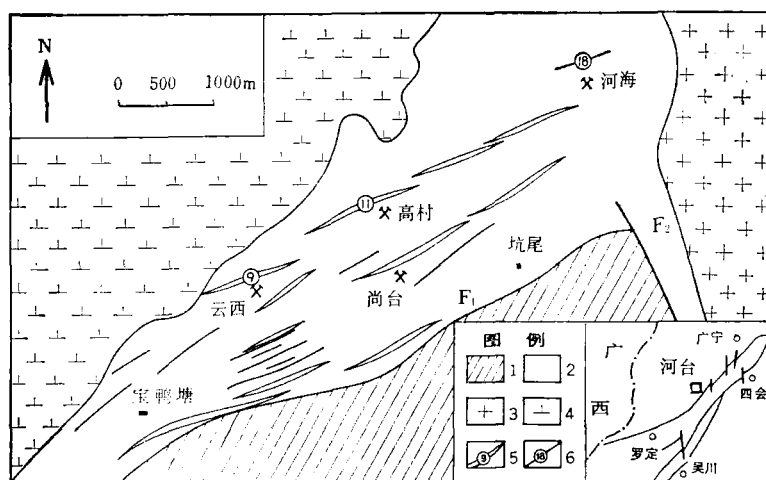


图1 河台金矿区地质简图

(据广东省719地质队资料修改)

1—奥陶系三尖群浅变质岩；2—震旦系C组石英云母片岩、变粒岩；3—花岗岩；4—花岗闪长岩；5—糜棱岩带及编号；6—含金石英脉

Fig. 1. Simplified geological map of the Hetai gold ore district.

1—Ordovician Sanjian Group; sericite phyllite and metasandstone; 2—Sinian C Formation; quartz-mica schist and leptynite; 3—Granite; 4—Granodiorite; 5—Mylonite Zone and its serial number; 6—Auriferous quartz vein.

岩、变质石英砂岩夹碳质页岩。

矿区西北部出露有云楼岗花岗闪长岩和斜长花岗岩，其U-Pb同位素年龄为 $209 \times 10^6 \sim 242 \times 10^6$  a。矿区东北部伍村岩体的岩性主要为巨斑状二长花岗岩，Rb-Sr同位素年龄为 $233 \times 10^6$  a。此外，在矿区内（特别在糜棱岩带之内和两侧）常出现形态复杂、规模不等的花岗伟晶质脉，其 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 同位素年龄为 $194 \times 10^6$  a。

矿区内线性构造十分发育，地层的层理、片理、褶皱和断裂构造均呈NEE走向。最突出的是发育有一条右行近水平剪切的韧性剪切带，该剪切带宽约1500~2000m，总体走向NE70°，倾向NW，倾角60°~80°，是河台金矿区的控矿构造。

剪切带中产有数十条互相近平行的糜棱岩。单条糜棱岩带的规模一般不大。最大的是高村矿床中的11号糜棱岩带，长1600m，宽约30~50m。其次是云西矿床中的9号糜棱岩带，地表出露长达1300m，宽约20~30m。这两条糜棱岩蕴藏了河台地区探明金储量的90%以上。从糜棱岩带的边缘到中心通常对称式地分布有初糜棱岩—糜棱岩—超糜棱岩。而金矿化主要分布在应力最集中的超糜棱岩中。

糜棱岩中的金矿化一般呈似层状、透镜状和脉状产出。这些矿体按产出形态和矿物组合特点而被区别为两种类型：①含金硅化岩。这是矿区中最重要的矿石类型（约占矿区总储量的85%以上）。这类矿体通常呈透镜状或似层状在剪切带内沿糜棱岩C面理分布。如高村矿床中的11号主矿体的产状为N70°E/NW<80°，厚1~5m，断续延长1400m，其产状和控矿的11号糜棱岩带的产状一致。矿石主要由烟灰色石英和少量的绢云母、白云母所组成。其中，石英基本上都是由动态重结晶作用形成的新颗粒，绢云母和白云母等片状矿物定向排列

构成C面理。矿石中的金属矿物以黄铁矿为主,黄铜矿、磁黄铁矿、菱铁矿次之,含少量的毒砂、辉铋矿和自然金。②含金石英脉。这类矿体明显地形成于两个阶段。早期的含金石英脉(如高村矿床中的51号脉和云西矿床中的202号脉)呈透镜状产在韧性剪切带的边部,通常沿糜棱岩C面理分布或与之呈小角度相交。这种含金石英脉的宽度一般几厘米至几米,延长几十米至几百米。矿石主要由乳白色石英和少量的绢云母所组成,金属矿物有黄铁矿、黄铜矿和自然金。脉中石英的波状消光、核幔构造、变形带和细粒化现象十分发育,反映其形成于较早的韧性变形环境。晚期的含金石英脉产在剪切带内部或旁侧围岩中,其产状一般与剪切带相交。河海矿床的18号含金石英脉为其代表。该石英脉长400m以上,宽1~2m,主要由石英(>90%)和少量的白云母,绿泥石组成,金属矿物以黄铁矿为主,黄铜矿较少。脉中石英不呈现韧性变形特点,显示其形成于浅层脆性构造环境。

## 2 样品的采集和分析

研究样品采自高村矿床160m中段11号糜棱岩带、云西矿床280m中段9号糜棱岩带和河海矿床18号石英脉。参加化学分析的样品均被制成光薄片作岩相学鉴定和显微构造分析。

稀土元素(REE)采用ICP-AES方法分析,利用碱熔,酸洗制备样液。该方法的分析下限可达 $10 \times 10^{-9} \sim 30 \times 10^{-9}$ ,准确度和精确度都可控制在3%~5%范围内。REE模式曲线采用Nakamura(1974)<sup>[7]</sup>球粒陨石值作标准, Eu/Eu\*值是按照Sm和Gd之间的线性内插值计算的。其它微量元素的分析方法是:采用活性炭吸附—原子吸收分光光度法和原子发射光谱法(AAS, AES)分析Au;原子荧光光谱法(AFS)分析As、Sb、Bi;热释法分析Hg;等离子直读光谱法(ICP)分析Cu、Pb、Zn、Sr、Ba、Ti、V、Mn、Cr、Co、Ni。所有样品中元素分析结果的合格率均控制在95%以上。

## 3 分析结果

矿区中各类岩石和矿石中REE分析结果列在表1中。分析表明本区糜棱岩的原岩震旦系C组片岩含有较丰富的REE。例如石英二云母片岩(HH008)含稀土元素总量( $\Sigma$ REE) $242 \times 10^{-6}$ ,而混合岩化云母石英片岩(GC101)中 $\Sigma$ REE也达 $165 \times 10^{-6}$ 。这两个样品中REE分布特点相似(图2a),都显示中等的负铕异常(Eu/Eu\*平均为0.48)和较强的轻稀土(LREE)富集趋势( $\text{La/Yb}=7.80 \sim 8.06$ ),REE球粒陨石标准化曲线呈典型的右倾型式。

REE在糜棱岩和超糜棱岩中的组成与片岩相比十分相似,也显示线性的LREE富集( $6.84 < \text{La/Yb} < 8.80$ )和中度的负铕异常( $0.55 < \text{Eu/Eu}^* < 0.66$ )。比较REE在这三类岩石中和片岩中的分布型式(图2a, 2b, 2c)不难看出,从片岩变化到糜棱岩和超糜棱岩,REE的绝对含量仅有轻微降低,而相对丰度没有发生明显改变,仍然保持了原岩中的分布型式。揭示了在韧性剪切过程中REE具有稳定性,表现为惰性特点。

硅化岩是产在超糜棱岩中的透镜状或似层状脉体。井下可见硅化岩脉和超糜棱岩之间有清晰的接触界线;镜下观察硅化岩与围岩相比表现为石英含量明显增加而云母类矿物含量显

表 1 广东河台金矿区各类地质体中REE组成特征( $10^{-6}$ )  
Table 1. REE concentrations in various sorts of rocks from the Hetai auriferous shear zone ( $10^{-6}$ )

| 岩 性     | 样 号    | La    | Ce    | Pr    | Nd    | Sm   | Eu   | Gd   | Tb   | Dy   | Ho   | Er   | Tm   | Yb   | Lu   | Y     | $\Sigma$ REE | $\frac{Eu}{Eu^*}$ | $\frac{La}{Yb}$ |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|--------------|-------------------|-----------------|
| 片 岩     | HH 008 | 50.48 | 98.98 | 13.05 | 44.13 | 8.70 | 1.03 | 7.79 | 1.21 | 6.78 | 1.13 | 3.96 | 0.61 | 3.92 | 0.58 | 36.50 | 242.65       | 0.38              | 7.80            |
|         | GC 101 | 35.16 | 68.89 | 9.00  | 30.11 | 5.96 | 1.05 | 5.21 | 0.75 | 4.16 | 0.83 | 2.17 | 0.32 | 1.85 | 0.30 | 20.77 | 165.78       | 0.57              | 8.06            |
| 糜棱岩     | GC 113 | 29.92 | 58.05 | 7.80  | 26.27 | 6.00 | 1.21 | 5.10 | 0.86 | 4.95 | 0.98 | 2.52 | 0.38 | 2.42 | 0.35 | 21.55 | 147.11       | 0.64              | 7.19            |
|         | GC 118 | 33.56 | 65.65 | 8.57  | 28.77 | 5.58 | 1.00 | 4.83 | 0.74 | 4.11 | 0.86 | 2.41 | 0.37 | 2.38 | 0.36 | 21.44 | 159.16       | 0.58              | 8.54            |
| 超糜棱岩    | GC 126 | 34.48 | 67.43 | 8.80  | 29.49 | 5.73 | 1.08 | 4.99 | 0.77 | 4.29 | 0.90 | 2.50 | 0.39 | 2.50 | 0.38 | 22.69 | 163.80       | 0.61              | 8.36            |
|         | GC 151 | 32.64 | 63.86 | 8.28  | 28.05 | 5.44 | 0.93 | 4.67 | 0.72 | 3.93 | 0.82 | 2.22 | 0.35 | 2.27 | 0.35 | 20.19 | 154.53       | 0.55              | 8.71            |
| 玻化岩     | YX 169 | 23.01 | 45.42 | 6.01  | 20.04 | 4.08 | 0.83 | 3.51 | 0.56 | 3.18 | 0.66 | 1.81 | 0.30 | 2.04 | 0.31 | 16.32 | 111.76       | 0.66              | 6.84            |
|         | GC 128 | 23.37 | 43.78 | 5.71  | 19.41 | 3.95 | 0.74 | 3.22 | 0.50 | 2.75 | 0.57 | 1.58 | 0.25 | 1.61 | 0.24 | 14.19 | 107.74       | 0.62              | 8.80            |
| 含金硅化岩   | GC 127 | 26.45 | 51.20 | 6.63  | 22.89 | 4.40 | 0.79 | 3.80 | 0.58 | 3.14 | 0.68 | 1.67 | 0.27 | 1.78 | 0.28 | 14.80 | 124.51       | 0.58              | 9.01            |
|         | GC 150 | 6.44  | 12.63 | 1.70  | 5.80  | 1.17 | 0.20 | 1.13 | 0.18 | 1.08 | 0.22 | 0.59 | 0.09 | 0.59 | 0.08 | 5.40  | 31.90        | 0.53              | 6.62            |
| 早期含金石英脉 | YX 167 | 5.53  | 12.36 | 1.54  | 5.15  | 1.03 | 0.17 | 1.09 | 0.18 | 1.17 | 0.21 | 0.68 | 0.11 | 0.69 | 0.09 | 6.19  | 30.03        | 0.49              | 4.86            |
|         | GC 102 | 15.42 | 29.55 | 3.88  | 12.67 | 2.43 | 0.43 | 1.91 | 0.27 | 1.32 | 0.27 | 0.72 | 0.11 | 0.70 | 0.11 | 6.33  | 69.79        | 0.59              | 13.19           |
| 晚期含金石英脉 | GC 107 | 12.78 | 25.10 | 3.46  | 11.88 | 2.75 | 0.45 | 2.51 | 0.41 | 2.48 | 0.52 | 1.42 | 0.22 | 1.47 | 0.22 | 13.59 | 65.67        | 0.52              | 5.27            |
|         | GC 117 | 22.46 | 42.72 | 5.58  | 18.77 | 3.85 | 0.64 | 3.52 | 0.56 | 3.30 | 0.67 | 1.78 | 0.28 | 1.79 | 0.26 | 16.50 | 106.18       | 0.52              | 7.60            |
| 晚期含金石英脉 | HH 170 | 4.20  | 7.84  | 1.24  | 3.82  | 0.87 | 0.15 | 0.69 | 0.10 | 0.53 | 0.11 | 0.33 | 0.05 | 0.27 | 0.04 | 2.49  | 20.21        | 0.57              | 9.43            |
|         | HH 172 | 1.41  | 1.52  | 0.24  | 0.66  | 0.14 | 0.03 | 0.13 | 0.02 | 0.15 | 0.04 | 0.13 | 0.02 | 0.09 | 0.02 | 0.97  | 4.60         | 0.67              | 9.19            |
| 花岗岩     | GC 148 | 0.30  | 0.60  | 0.10  | 0.47  | 0.06 | 0.02 | 0.06 | 0.01 | 0.06 | 0.01 | 0.04 | 0.01 | 0.10 | 0.01 | 0.28  | 1.85         | 1.02              | 1.82            |
|         | GC 149 | 0.50  | 3.38  | 0.27  | 1.04  | 0.20 | 0.02 | 0.15 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.31  | 5.84         | 0.34              | 11.33           |
| 花岗岩脉    | GC 152 | 29.90 | 58.91 | 7.60  | 25.37 | 4.95 | 0.67 | 4.27 | 0.66 | 3.51 | 0.75 | 2.06 | 0.33 | 2.04 | 0.32 | 18.72 | 141.48       | 0.44              | 8.88            |
|         | GC 156 | 35.87 | 70.35 | 9.13  | 30.73 | 6.18 | 1.02 | 5.43 | 0.79 | 4.03 | 0.76 | 1.83 | 0.25 | 1.41 | 0.21 | 18.85 | 167.99       | 0.53              | 15.42           |

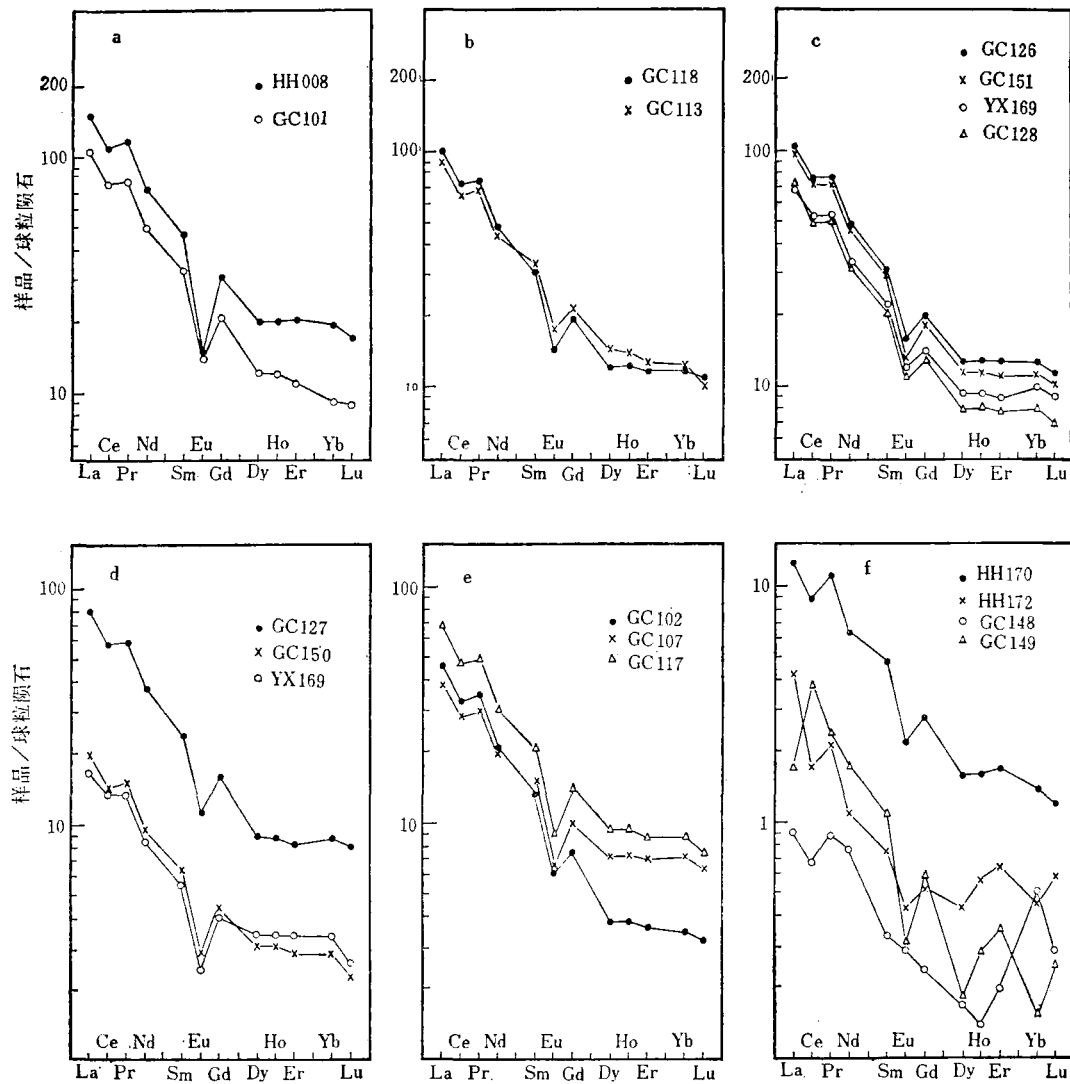


图 2 河台含金剪切带中各类岩石的 REE 分布模式图

a—片岩；b—糜棱岩；c—超糜棱岩；d—含金硅化岩；e—早期含金石英脉；f—晚期含金石英脉

Fig. 2. Chondrite-normalized REE patterns of rocks from the Hetai auriferous shear zone.

a—Schist; b—Mylonite; c—Ultramylonite; d—auriferous silicified rock; e—Early-stage auriferous quartz vein; f—Late-stage auriferous quartz vein.

著减少。说明硅化岩脉的成因很可能是一种富硅质流体沿糜棱岩中某些剪切破裂位置充填交代的结果。硅化岩中各种糜棱组构如C面理和S面理等十分发育，反映了这些岩脉应生成于韧性剪切环境。然而，其中硫化物和自然金矿化却沿着晚期张性构造充填而呈细脉状、网脉状和角砾状分布，显示了在脆性阶段成矿的特点。REE分析结果表明，与糜棱岩围岩相比硅化岩中REE绝对含量有明显变化，平均 $\Sigma\text{REE}$ 从 $143 \times 10^{-6}$ 下降到 $62 \times 10^{-6}$ 。然而REE的相对含量却变化不大，也呈LREE富集型( $4.86 < \text{La}/\text{Yb} < 9.01$ )和中等的负铕异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$ 平均为0.53)，REE球粒陨石标准曲线形状(图2d)与围岩的(图2c)相

似。这种 REE 分布特征可以用形成硅化岩的富 Si 质流体从围岩中获取了大部分 REE 来解释。

早期含金石英脉呈透镜状或层脉状平行韧性剪切带产出, 空间上膨大缩小, 尖灭再现特征明显。矿脉中石英的波状消光, 变形条带和动态重结晶现象十分清楚。和硅化岩型矿脉一样, 这类含金石英脉中硫化物和自然金矿化也是沿着脉中晚期脆性构造分布的, 形成细脉状、

表 2 广东河台金矿区岩石和矿石中微量元素含量  
Table 2. Minor element concentrations of rocks and ores from the Hetai gold district

| 岩性      | 样品号    | 分析元素 | Au    | Hg <sup>①</sup> | As   | Sb   | Bi   | Cu               | Pb  | Zn  | Sr  | Ba   | Ti   | V   | Cr  | Mn   | Co  | Ni  |
|---------|--------|------|-------|-----------------|------|------|------|------------------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|
| 片岩      | HH 008 |      | 0.2   | 468             | 12   | 0.2  | 1.6  | 26               | 28  | 142 | 46  | 454  | 6215 | 126 | 79  | 707  | 28  | 55  |
|         | GC 101 |      | 0.03  | 964             | 5.5  | 1.0  | 0.8  | 102              | 43  | 13  | 53  | 334  | 1076 | 14  | 11  | 303  | 8   | 9   |
|         | GC 125 |      | 0.01  | 176             | 13   | 0.4  | 0.7  | 19               | 35  | 155 | 72  | 557  | 3446 | 66  | 23  | 546  | 13  | 16  |
|         | 平均     |      | 0.08  | 536             | 9.8  | 0.5  | 1.0  | 49               | 35  | 103 | 57  | 448  | 3579 | 69  | 38  | 519  | 16  | 27  |
| 糜棱岩     | GC 113 |      | 0.3   | 276             | 4.2  | 0.3  | 2.3  | 84               | 26  | 30  | 87  | 426  | 1495 | 29  | 6   | 326  | 12  | 10  |
|         | GC 118 |      | 0.2   | 125             | 8.9  | 0.6  | 0.8  | 31               | 31  | 30  | 20  | 293  | 1427 | 26  | 19  | 424  | 11  | 13  |
|         | GC 120 |      | 0.3   | 192             | 1.3  | 0.3  | 0.5  | 119              | 21  | 15  | 18  | 395  | 2397 | 43  | 29  | 379  | 12  | 17  |
|         | 平均     |      | 0.27  | 198             | 4.8  | 0.4  | 1.2  | 78               | 26  | 25  | 42  | 371  | 1773 | 33  | 18  | 376  | 12  | 13  |
| 超糜棱岩    | GC 126 |      | 0.5   | 172             | 16   | 1.0  | 1.0  | 250              | 23  | 33  | 35  | 460  | 3059 | 87  | 51  | 388  | 17  | 34  |
|         | GC 151 |      | 0.7   | 276             | 3.2  | 0.1  | 1.2  | 332              | 11  | 47  | 47  | 386  | 2985 | 71  | 54  | 650  | 12  | 24  |
|         | YX 169 |      | 0.2   | 328             | 14   | 0.4  | 0.3  | 28               | 30  | 28  | 83  | 270  | 1664 | 36  | 29  | 462  | 9   | 13  |
|         | 平均     |      | 0.5   | 259             | 11.1 | 0.5  | 0.8  | 203              | 25  | 36  | 55  | 372  | 2569 | 65  | 45  | 500  | 13  | 24  |
| 玻化岩     | GC 128 |      | 0.2   | 608             | 13   | 0.4  | 0.3  | 209              | 15  | 36  | 43  | 696  | 2147 | 41  | 37  | 319  | 8   | 22  |
| 含金硅化岩   | GC 127 |      | 23.1  | 328             | 3.4  | 0.6  | 7.7  | >2000            | 21  | 187 | 12  | 295  | 2046 | 52  | 40  | 412  | 16  | 27  |
|         | GC 150 |      | 101.7 | 1000            | 3.5  | 0.6  | 31   | >2000            | 24  | 314 | 3   | 63   | 320  | 32  | 4   | 310  | 52  | 45  |
|         | YX 167 |      | 161.3 | 376             | 3.2  | 0.1  | 1.2  | >2000            | 68  | 655 | 5   | 34   | 308  | 15  | 12  | 606  | 136 | 132 |
|         | 平均     |      | 95.4  | 568             | 3.4  | 0.4  | 13.3 | >2000            | 38  | 385 | 7   | 131  | 891  | 33  | 19  | 443  | 68  | 68  |
| 早期含金石英脉 | GC 102 |      | 0.01  | 170             | 2.9  | 0.9  | 0.1  | 48               | 14  | 2   | 2   | 8    | 28   | 2   | 12  | 463  | 8   | 12  |
|         | GC 105 |      | 0.4   | 1000            | 60   | 48   | 0.7  | 65               | 345 | 951 | 135 | 237  | 3800 | 61  | 17  | 1873 | 6   | 16  |
|         | GC 107 |      | 62.4  | 396             | 162  | 5.4  | 529  | >2000            | 686 | 252 | 2   | 17   | 116  | 8   | 2   | 182  | 39  | 72  |
|         | GC 116 |      | 7.2   | 756             | 36   | 1.9  | 35   | >2000            | 43  | 212 | 4   | 123  | 547  | 26  | 18  | 279  | 82  | 63  |
|         | GC 117 |      | 0.03  | 584             | 14   | 0.9  | 2.3  | 62               | 30  | 42  | 23  | 311  | 2243 | 51  | 39  | 446  | 15  | 26  |
|         | 平均     |      | 14.0  | 581             | 55   | 11.4 | 113  | 835 <sup>②</sup> | 224 | 292 | 33  | 139  | 1347 | 30  | 18  | 649  | 30  | 38  |
| 晚期含金石英脉 | GC 148 |      | 0.2   | 180             | 1.4  | 0.2  | 0.1  | 11               | 4   | 61  | 2   | 9    | 28   | 2   | 2   | 297  | 2   | 2   |
|         | GC 149 |      | 0.4   | 120             | 0.6  | 0.3  | 0.7  | 209              | 8   | 9   | 4   | 72   | 540  | 10  | 18  | 527  | 11  | 69  |
|         | HH 170 |      | 1.5   | 240             | 34   | 0.5  | 8.7  | 164              | 12  | 19  | 2   | 5    | 53   | 2   | 100 | 288  | 15  | 10  |
|         | HH 172 |      | 4.9   | 512             | 6.2  | 0.5  | 36   | 58               | 8   | 20  | 2   | 65   | 16   | 2   | 7   | 240  | 7   | 4   |
|         | 平均     |      | 1.8   | 263             | 10.5 | 0.4  | 11.4 | 111              | 8   | 27  | 3   | 38   | 159  | 4   | 32  | 338  | 9   | 21  |
| 花岗伟晶岩   | GC 124 |      | 0.3   | 1000            | 3.5  | 0.7  | 0.6  | 53               | 24  | 25  | 38  | 248  | 277  | 4   | 4   | 367  | 7   | 9   |
| 花岗岩脉    | GC 152 |      | 0.6   | 120             | 3.2  | 0.1  | 1.2  | 425              | 33  | 54  | 10  | 362  | 2122 | 56  | 46  | 315  | 30  | 27  |
| 花岗闪长岩   | YX 156 |      | 0.5   | 120             | 1.6  | 0.2  | 0.6  | 54               | 24  | 109 | 133 | 1116 | 3996 | 76  | 32  | 773  | 18  | 20  |

① Hg浓度单位为 $10^{-9}$ , 余为 $10^{-6}$ ; ② Cu含量大于 $2000 \times 10^{-6}$ 时, 取 $2000 \times 10^{-6}$ 参加计算

马尾丝状、网脉状构造。说明这类矿脉的形成可能也经历了早期韧性阶段(形成石英脉)和晚期脆性阶段(产生矿化)。取样分析表明石英脉中 REE 的绝对和相对含量与含金硅化岩都很相似(见图 2 d, 2 e), 也呈强烈的 LREE 富集和中等的负铕异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  平均为 0.54)。反映了这类含金石英脉和含金硅化岩有相似的成因和相同的成岩成矿物质来源。

晚期含金石英脉分布在糜棱岩带以内或以外的片岩中, 延伸方向不受糜棱岩面理控制, 石英的变形特征不明显。表现为浅层脆性构造环境成脉的特点。这类石英脉中 REE 含量很低( $\Sigma\text{REE}$  平均为  $8.01 \times 10^{-6}$ ), REE 组成变化很大( $0.34 < \text{Eu}/\text{Eu}^* < 1.02$ ,  $1.82 < \text{La}/\text{Yb} < 11.33$ )。其 REE 球粒陨石标准曲线(图 2 f)显著偏离线性特征, 与早期含金石英脉中 REE 分布特点极不相同。晚期含金石英脉中 REE 的这种组成特点说明与之相关的流体来源比较复杂, 很可能受到大气降水的影响。

微量元素的分析结果(表 2)表明, 在糜棱岩化过程中多数元素保持稳定, 仅 Au 和 Cu 有较明显富集。由于糜棱岩和超糜棱岩样品是在距离矿脉 5 cm 至 10 m 范围内采集的, 其中 Au 含量的普遍升高和均匀分布现象反映了在糜棱岩化过程中发生了金的初步矿化。

含金硅化岩和早期含金石英脉中微量元素的含量和组合与围岩相比都表现为 Sr、Ba、Ti、V、Cr 的亏损和 Hg、As、Sb、Pb、Zn 的轻微富集以及 Au、Cu、Bi 浓度的大幅度提高。对矿脉边部破碎强烈和硫化物网脉发育的样品(GC 107, GC 116)和矿脉中部硫化物脉少的样品(GC 102, GC 104, GC 107)分别取样分析结果显示前者 Au、Cu、Bi 三种元素的含量是后者的几十倍到几千倍, 而其它元素的浓度变化却不明显。证明了这一阶段金矿化确有可能发生在成脉以后的破裂构造活动期, 成矿流体应以 Au-Cu-Bi 组合为特征。已知 Au-Cu-Bi 组合往往反映了较高温的成矿环境并指示了侵入体的可能存在<sup>[3]</sup>。因此, 这些叠加在硅化岩和石英脉之上的成矿流体很可能受到岩浆作用的影响。

晚期含金石英脉中微量元素的分布与早期含金石英脉相比差别很大(表 2)。在晚期含金石英脉中几乎所有元素都表现为相对亏损, 尤其是相对贫乏 Cu (平均含 Cu  $111 \times 10^{-6}$ )。而 Cu 在早期含金石英脉中的含量可以高达  $2000 \times 10^{-6}$  以上。这就说明两期含金石英脉的成因存在明显差别。根据 REE 分布特点( $\Sigma\text{REE}$  低, REE 分布型式偏离线性规律)推测, 形成晚期含金石英脉的流体可能主要是循环的地下水, 金矿化则可能是从含金剪切带中活化转移后再沉淀而成的。

## 4 结果讨论

上述分析表明河台含金剪切带中 REE 的分布表现出两种行为:

(1) 在形成糜棱岩的韧性剪切变形阶段虽然发生了矿物种类和化学组成的明显变化<sup>[3]</sup>, 但原岩中的 REE 分布型式未变。说明糜棱岩和超糜棱岩中 REE 的组成和丰度可以反映原岩的性质和动力变质环境。

(2) 在出现热液充填的韧-脆性和脆性变形阶段, REE 组成发生明显变化, 表现为含金硅质岩和早期含金石英脉中 REE 绝对含量的显著降低以及晚期石英脉中 REE 分布型式的广泛变化。

REE 在剪切带中分布行为的上述差别可能是由剪切过程不同阶段体系中水/岩比的差别

以及流体运移聚集方式的不同造成的。研究表明<sup>[9]</sup>, 在剪切带浅层环境内流体的移动是由地震泵压作用引起的, 此时往往有巨量的循环水通过断层, 流体的活动以充填方式为主。在深层韧性剪切带, 体系水/岩比相对较低, 流体的运动以渗滤扩散方式为主。在中浅层韧-脆性过渡环境、流体的活动则兼有充填和渗滤的双重特点。显然, 在水/岩比低、流体运动速度慢的韧性剪切环境中形成的糜棱岩是可以保留原岩中的REE组成的。然而, 从韧-脆性变形到脆性变形阶段, 由于体系中水/岩比例逐渐提高, 流体的运移和聚集渐以充填方式为主, 结果所产生的石英脉中REE分布型式越来越明显地受到流体性质的影响(如图3所示 $\Sigma$ REE的变化)。也就是说在剪切过程中虽然变形作用和热液循环作用是相辅相成的, 然而REE的地球化学行为似乎和变形作用关系不大而主要受热液作用的影响。

通过金等微量元素的分布和组合特点的研究可以得出河台含金剪切带的矿化经历了三个阶段:

第一阶段相当于韧性变形阶段。由于剪切造成的压力差和渗透率的提高, 剪切带为流体运动起了导流作用而普遍发生了金的矿化, 形成了含 $Au < 1 \times 10^{-6}$ 的糜棱岩(图3)。由REE和其它微量元素的组成推测, 这一阶段的成矿流体主要是和围岩达到平衡的变质热液。

第二阶段剪切带处于韧-脆性环境。剪切带因局部张开和充填交代作用而形成透镜状或似层状的硅质岩和石英脉。这些脉状构造在成脉阶段并未发生矿化。矿化是伴随着成脉以后构造重新活动发生的。由于这些岩脉相对于围岩刚性较强, 在挤压作用下易于破碎而形成有利的容矿构造并优先矿化。从图3中可以看出这一期金矿化形成了 $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 的金矿石。根据REE和其它微量元素的组成特点判断形成本阶段容矿构造的流体可能主要来自之围岩, 而矿石中成矿元素组合和方铅矿的铅同位素组成特征<sup>[1]</sup>说明造成矿化叠加的流体可能与岩浆热液有关。

第三阶段剪切带位于浅层脆性环境。在拉伸构造机制的作用下, 在剪切带以内或旁侧的片岩中产生一系列张性构造, 因充填作用而形成含 $Au 1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ 的含金石英脉。这些脉中矿物组合和微量元素组合都和早期的含金石英脉有明显差别。根据脉中REE的含量和分布型式分析这类含金石英脉的形成可能明显地受到地下循环水的影响。

## 5 结论

通过对河台含金剪切带中REE和其它微量元素的分布和组合特征的研究可以得出如下

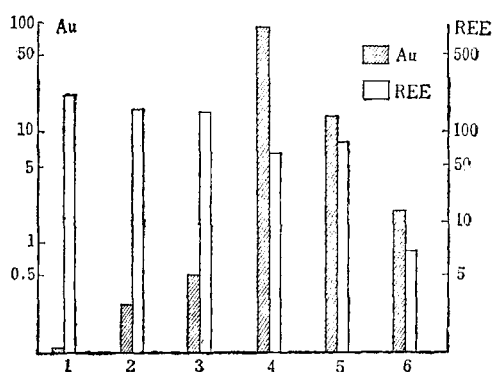


图3 河台含金剪切带中各类岩石和矿石中Au和REE平均含量( $10^{-6}$ )

1—片岩; 2—糜棱岩; 3—超糜棱岩; 4—含金硅化岩; 5—早期含金石英脉; 6—晚期含金石英脉

Fig. 3. Average Au and REE contents of rocks and ores from the Hetai auriferous shear zone ( $10^{-6}$ ).

1—Schist; 2—Mylonite; 3—Ultramylonite; 4—Auriferous silicified rock; 5—Early-stage auriferous quartz vein; 6—Late-stage auriferous quartz vein.



结论:

(1) 在深层韧性剪切环境下发生的糜棱岩化过程中 REE 保持稳定性。在糜棱岩、超糜棱岩等韧性变形岩石中 REE 的组成和丰度都可以反映原岩的性质和特点。

(2) 在韧-脆性和脆性构造环境下由流体充填作用形成的各类构造岩中 REE 分布式呈现广泛的变化。变化的程度与流体的充填程度成正比,变化的特点受流体和围岩中 REE 的组成和混合程度两方面因素所控制。

(3) Au 和其它微量元素的分布特征证明该含金剪切带的形成和演化经历了三个阶段。第一阶段相当于韧性剪切阶段,伴随着糜棱岩的形成,剪切带中普遍发生了金的初步矿化,形成含 Au ( $<1 \times 10^{-6}$ ) 的糜棱岩。第二阶段发生在韧-脆性构造环境。由于剪切带的局部张开在剪切带的中心和边部形成似层状或透境状的容矿构造——硅质岩或石英脉。随着剪切带抬升,应变硬化和沿剪切带的构造重新活动,使硅质岩或石英脉遭到破碎作用并优先矿化,结果形成含金 ( $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ ) 的金矿脉。第三阶段形成于浅层脆性构造环境。由于拉伸和张裂在剪切带内部和旁侧形成形态不规则的晚期石英脉,并产生含 Au ( $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$ ) 的金矿化。

### 参 考 文 献

- 1 王鹤年,张景荣,戴爱华.广东河台糜棱岩带蚀变岩型金矿床的地球化学研究.矿床地质,1989,8(2):61~71
- 2 Reitan P H, Roelandts I. Rare earth partitioning: coexisting metamorphic pyroxene. Geol. Soc. Am. Abstr., 1973, (5): 778~779
- 3 Pride C, Muecke G K. Rare earth element distributions among coexisting granulite facies minerals, Scourian Complex, NW Scotland. Contrib. Mineral. Petrol., 1981, 76:463~471
- 4 Corey M C, Chatterjee A K. Characteristics of REE and other trace elements in response to successive and superimposed metasomatism within a portion of the South Mountain Batholith, Nova Scotia, Canada. Chemical Geology, 1990, 85: 265~285
- 5 Alderton D H M, Pearce J A, Potts P J. Rare earth element mobility during granite alteration: evidence from Southwest England. Earth Planet. Sci. Lett., 1980, 49:149~165
- 6 Condie K C, Viljoen M J, Kable E J D. Effects of alteration on element distributions in Archean tholeiites from the Barberton Greenstone Belt, South Africa. Contrib. Mineral. Petrol., 1977, 64:75~89
- 7 Nakamura N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. Geochim. Cosmochim. Acta., 1974, 38: 757~775
- 8 Bonnemaison M, Marcoux E. Auriferous mineralization in some shear zones: a three-stage model of metallogenesis. Mineral Deposita, 1990, 25:96~104
- 9 Sibson R h, McMoore J, Rankin R H. Seismic pumping—a hydrothermal fluid transport mechanism. Geol. Soc. London Jourl, 1975, 131:653~659

## CHARACTERISTICS OF REE AND OTHER TRAGE ELEMENTS WITHIN A SHEAR ZONE OF THE HETAI GOLD DEPOSIT, GUANGDONG PROVINCE

Chen Jun and Wang Henian

*(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu Province)*

### Abstract

The Hetai gold deposit is present within a shear zone hosted by metavolcano-sedimentary units in the upper part of the Late Proterozoic Sinian System. The shear zone, striking northeast and dipping northwest, is about 2km long and has an average thickness of 100m. Ores in the shear zone occur as a series of lenticular and vein-type bodies.

A three-stage model for the formation of the auriferous shear zone has been suggested. The early stage was characterized by ductile deformation during which auriferous mylonite containing less than  $1 \times 10^{-6}$  Au was formed. The second stage took place in an environment of ductile-brittle deformation where lenticular ores with about  $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$  Au occurred. The third stage developed during brittle deformation accompanied by emplacement of auriferous quartz veins with  $1 \times 10^{-6} \sim 5 \times 10^{-6}$  Au.

A REE pattern analysis demonstrates that, in spite of important mineralogical and chemical changes of the original metamorphic rocks, no significant modification of lanthanide distribution occurred during ductile deformation of the shear zone that resulted in the formation of protomylonite, mylonite and ultramylonite. In contrast, extensive variations in REE patterns are observed in hydrothermal infiltration rocks which are products of the ductile-brittle and brittle deformation stage of the shear zone. Therefore, it seems that the REE behavior during dynamometamorphism was similar to that during metamorphism and hydrothermal alteration, as evidenced both by fluid/rock ratios and by REE patterns and REE abundances of the reacting fluids and rocks.