

新疆包尔图铜矿稀土元素 地球化学特征及其地质意义

庞绪成^{1,2} 朱浩锋¹ 胡瑞忠² 宗 静¹

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作, 454003;
2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要:包尔图铜矿床位于南天山库米什洋盆俯冲变质带的边缘, 矿体受断裂构造控制。矿区围岩为一套中深变质岩, 其稀土元素组成具有如下特征: $\sum\text{REE}$ 较高, $\text{LREE}/\text{HREE}=2.46\sim 16.86$, 轻重稀土元素明显分异, 且轻稀土相对富集, 负铕异常, 配分模式曲线向右倾斜。矿石的 $\sum\text{REE}$ 相对较低, $\text{LREE}/\text{HREE}=0.06\sim 0.97$, 轻重稀土元素明显分异, 重稀土相对富集, 配分曲线向左倾斜, 与混合岩脉体的稀土元素配分模式相近。稀土元素组成特征指示矿床的成矿过程可能与混合岩化作用有关。结合矿床地质特征, 认为包尔图铜矿床为变质热液型铜矿床。

关键词: 稀土元素; 地球化学特征; 混合岩化; 包尔图铜矿; 新疆

中图分类号: P595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2010)06-1699-11

稀土元素作为具有相同或相近电价和离子半径以及相似地球化学行为的元素组^[1-12], 在岩浆作用体系中矿物或矿物熔体之间的分配行为主要受晶体场控制, 因此长期以来被广泛应用于与岩浆作用有关的成岩成矿地球化学示踪。笔者对包尔图铜矿的赋矿围岩斜长角闪片岩、片麻岩、混合岩和铜矿石的稀土元素地球化学特征进行了系统研究, 探讨了矿床形成过程中的 REE 特征及矿床成因。

1 区域地质背景

包尔图铜矿位于新疆和硕县北部, 大地构造位置属于塔里木板块北缘南天山与西天山接触带的东段。以乌瓦门—包尔图深大断裂为界, 北为西天山那拉提早古生代构造混杂带(八台台岛弧带小区), 南为南天山哈尔克晚志留世至早泥盆世弧后盆地(库米什洋盆俯冲变质带小区)。出露地层包括元古宇、古生界和新生界。矿床位于库米什洋盆俯冲变质带的边缘, 是南天山哈尔克—库米什金、铜、铅、锌、锑、

铁、锰多金属成矿带的重要部分(图 1)。

矿区主要出露上志留—下泥盆统阿尔彼什麦布拉克组(S_3-D_{1a})区域变质岩系, 由老至新分为 3 个亚组: 第一亚组($S_3-D_{1a}^a$)是直接赋矿围岩, 岩性为混合岩和片麻岩; 第二亚组($S_3-D_{1a}^b$)为千枚岩(Ph)类夹大理岩; 第三亚组($S_3-D_{1a}^c$)出露在本区西部一带, 岩性为板岩(S)与大理岩(Mb)互层。各岩性段均为整合接触。

艾木太乌拉短轴背斜是本区主要的控矿构造。属于南天山库米什晚志留—早泥盆世洋盆褶皱变质带的一部分, 是南天山志留纪洋盆在早泥盆世封闭过程中向北俯冲抬升逐渐形成的, 铜矿点沿轴部附近基本等间距分布。

区域岩浆岩发育。以华力西期早期侵入的灰色二云母花岗岩(γ_1^4)规模最大, 形成西天山岩浆弧。次为沿包尔图断裂两侧侵入的华西力中期的红色花岗岩(γ_2^4)及大量酸性岩脉, 代表西天山与南天山两侧构造单元的碰撞闭合时期。

收稿日期: 2010-01-10; 改回日期: 2010-05-08

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40634020)及河南理工大学博士基金(648510)资助。

作者简介: 庞绪成, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 主要从事矿产勘查及矿床学研究; E-mail: jpxc@hpu.edu.cn。

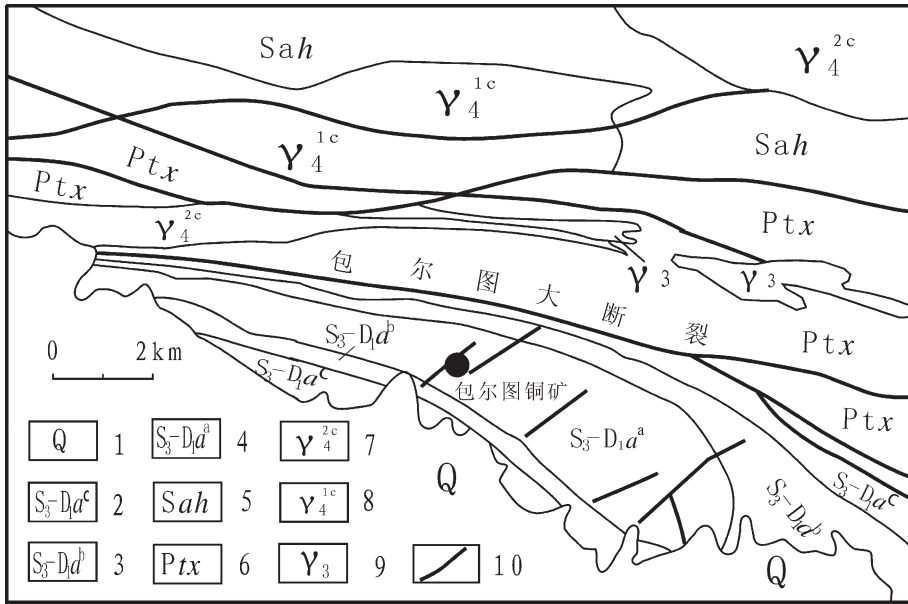


图1 新疆包尔图铜矿区域地质图

1—第四系砂砾石层;2~4—下古生界阿尔彼什麦布拉组克;2—第三亚组板岩夹大理岩;3—第二亚组千枚岩夹大理岩;4—第一亚组混合岩、片麻岩夹斜长片岩;5—志留系阿赫布拉克组砂砾岩夹绿泥石英片岩;6—元古宇中天山群星星峡组中深变质岩;7—华力西中期花岗岩;8—华力西早期二云母花岗岩;9—加里东期花岗岩;10—断层

Fig.1 Regional geological map of the Baortu copper ore district in Xinjiang

1—Quaternary sand and gravel layer; 2—4 Lower Palaeozoic Al Peter Shimaibulake Formation; 2— Slate intercalated with marble of 3rd Subformation; 3—Phyllite intercalated with marble of 2nd Subformation; 4—Migmatite and gneiss intercalated with plagioclase schist of 1st Subformation; 5— Glutenite intercalated with chlorite schist in Silurian Ahebulake Fomration; 6—Medium-deep grade metamorphic rock in Xingxongxia Formation of Proterozoic Zhongtianshan Group; 7—Middle Variscan granite; 8—Early Variscan two-mica granite; 9—Caledonian granite; 10— Fault

2 矿床地质特征

2.1 赋矿围岩

主要赋矿围岩为艾木太乌拉短轴背斜轴部附近的阿尔彼什麦布拉克组第一亚组(S₃-D_{1a})中深变质岩。本亚组地层自背斜轴部向两翼由混合岩相逐步过渡到片麻岩相和绿片岩相,细分为3个岩性段(岩相带),各段特征明显(图2):

第一岩性段(Mi):岩性为浅灰色条带状混合岩,主要分布在背斜轴部一带,呈NW-SE向展布,倾角10°~30°,厚46~200 m。与上覆地层呈渐变过渡。基体为深灰色片麻岩及部分斜长角闪片岩和黑色石英片岩,花岗质脉体为浅灰色。铜矿化多存在于本岩性段的破碎蚀变带中。

第二岩性段(Gn):岩性为深灰色黑云斜长片麻岩(局部夹黑云石英片岩和角闪斜长片岩)。受背斜影响,地层倾角北缓(20°~40°)南陡(30°~60°),厚度50~300 m,西薄东厚。

第三岩性段(Sch):岩性为黑云石英片岩夹角闪斜长片岩。地层倾角35°~65°,厚度30~100 m。

2.2 控矿构造

矿区主要褶皱艾木太乌拉短轴背斜长大于10 km,背斜轴呈NW-SE向,控制区域矿床的分布。背斜核部地层变质程度高,向两翼逐渐降低。翼部地层产状南陡北缓。背斜轴部被NEE向的F₂和F₃断层错断,破碎带宽3~50 m,断距50~300 m,是主要容矿构造。F₁断层为成矿后构造,对矿体起破坏作用。

由于后期构造运动的影响,在断裂带及其两侧一定范围内经历了由角砾岩→碎裂岩→糜棱岩→构造片岩的递进动力变质作用。

构造角砾岩:包含各种原岩成分的断层角砾岩,以尖棱角状或出现密集裂隙、角砾排列杂乱为特征(图3左)。角砾大小悬殊,胶结物主要为铁质和硅质,成矿地段多以硫化物胶结。

碎裂岩及碎斑岩:是构造角砾岩受进一步挤压、

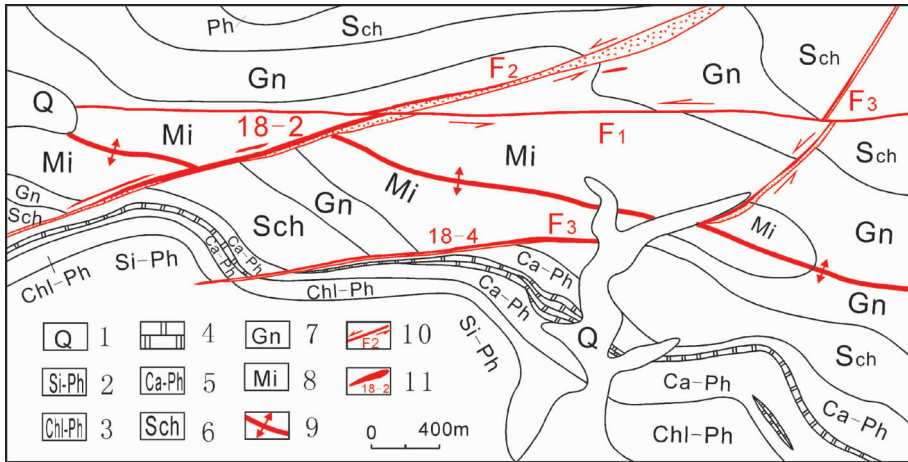


图 2 新疆包儿图铜矿区地质简图

1—第四系;2~8—阿尔彼什麦布拉克组;2~5—第二亚组;2—硅质千枚岩;3—绿泥石千枚岩;
 4—大理岩;5—钙质千枚岩;6~8—第一亚组;6—第三岩性段片岩;7—第二岩性段片麻岩;
 8—第一岩性段条带状混合岩;9—艾木太乌拉背斜轴;10—断层及编号;11—铜矿体及编号

Fig.2 Simplified geological map of the Baoertu copper ore district in Xinjiang

1—Quaternary; 2~8— Al Peter Shimaibulake Formation; 2~5 2nd Subformation; 2—Siliceous phyllite;
 3—Chlorite phyllite; 4—Marble; 5—Calcareous phyllite; 6~8—1st Subformation; 6—Schist of 3rd lithologic member;
 7—Gneiss of 2nd lithologic member; 8—Banded migmatite of 1st lithologic member;
 9—Ai Mutaiwula anticline axis; 10—Fault and its serial number; 11—Copper ore body and its serial number



图 3 构造角砾岩(左)和碎裂岩(右)

Fig.3 Tectonic breccia (left) and cataclasite (right)

剪切作用形成的(图 3 右)。角砾呈砾状或棱角状,粒度不等,大角砾间被细小的角砾或化学物质胶结。在成矿区段,碎裂的石英脉被大量的硫化物充填,形成铜矿石。镜下观察显示石英颗粒具明显的波状消光。

糜棱岩和构造片岩:位于构造带的中心部位,包括糜棱岩和糜棱岩化的石英片岩。厚度一般为 0.1~3 m。线理发育,具明显的眼球状及带状构造。

2.3 矿体特征

工业矿体赋存于 F₂、F₃ 断裂带内,延伸稳定,规模大,主矿体包括 18-2 及 18-4 两条,产状严格受断裂带控制。

18-2 号铜矿体赋存于背斜轴南翼的 F₂ 断层内(图 4),矿体走向 70°~80°,形态呈板状、似层状,矿化较均匀。矿体长 1300 m,厚度 0.49~5.32 m,平均

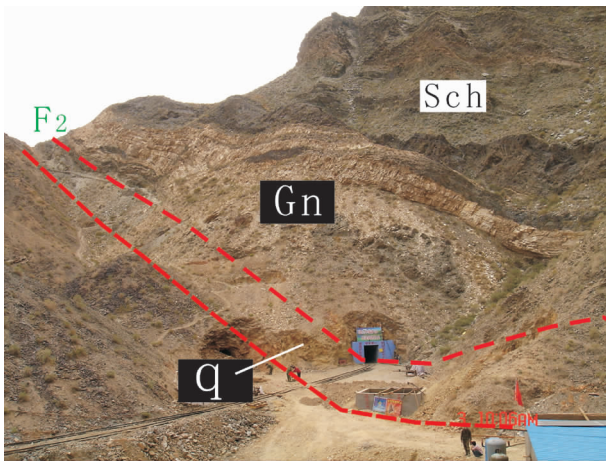


图 4 F_2 断裂(18-2 铜矿体)切过背斜核部

Sch—片岩;Gn—片麻岩;q—18-2 石英脉及铜矿体

Fig.4 F_2 fracture (18-2 copper ore) cutting through anticline core
Sch—Schist; Gn—Gneiss; q—18-2 quartz vein and copper ore body

厚度 2.51 m,地表产状近直立,向下南倾,倾角 $45^\circ\sim 88^\circ$ 。铜品位一般为 $0.29\times 10^{-2}\sim 5.3\times 10^{-2}$,平均 0.89×10^{-2} ,且有向下变富趋势。

18-4 号铜矿体赋存于 F_3 断层内,矿体形态呈板状、似层状,矿化较均匀。矿体长 1230 m,厚度 0.64~3.92 m,平均厚度 2.75 m,铜品位一般为 $0.23\times 10^{-2}\sim 2.27\times 10^{-2}$,平均 0.75×10^{-2} ,矿体倾向 SE,倾角 $45^\circ\sim 85^\circ$ 。

硅化是最普遍强烈的围岩蚀变,其次是绢云母化、绿泥石化及碳酸盐化。主要矿化为黄铜矿化和黄铁矿化,次为磁黄铁矿化。浅部辉铜矿和孔雀石化较普遍。硫化物主要作为胶结物以块状或网脉状存在于碎裂岩及碎裂石英脉的裂隙中。在矿化带中心,黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿等呈团块状或脉状、网脉状,碎裂石英脉呈块状、碎粒状,原岩结构及构造等特征已消失;向外硅化、绢云母化交代围岩,保留原岩的构造及残块,矿化较弱;再向外,可见石英、绢云母呈条带状叠加于围岩之中。绿泥石化在近矿围岩中普遍存在。脉状或条带状碳酸盐化的出现,标志着成矿期的结束。

沿主断层派生的次级 X 剪切裂隙中也有矿化体或小矿体,但走向短,规模小,走向与主矿体平行,产状南倾或北倾,倾角较陡($60^\circ\sim 80^\circ$),在 F_2 断裂上盘较发育,矿化不连续,长度一般 40~60 m,厚度 1~4 m,品位 $0.21\times 10^{-2}\sim 0.96\times 10^{-2}$ 。

2.4 矿化阶段

根据构造及矿物共生组合关系,可划分为 3 个成矿阶段:石英脉阶段、硫化物-碎裂石英脉阶段和碳酸盐阶段。

(1)石英脉阶段:本阶段的石英脉几乎全为乳白色石英组成,极少含硫化物(局部磁黄铁矿化较强)及其他共生矿物,在构造带内生成时间早、分布范围广。脉体形态较复杂,某些地段呈现复杂的蛇曲状、香肠状、火焰状和钩状等。脉体定向拉长,并被破劈理、片理切穿成豆芽状小条,其内有较多的与剪切张裂隙同步生长的大小不等的角砾状围岩残块。硫化物含量少,Cu 品位一般在 0.2×10^{-2} 以下,经济意义不大。

(2)硫化物-碎裂石英脉阶段:以含有较多的黄铜矿和黄铁矿及少量磁黄铁矿为特征。早期的石英脉及构造岩被搓碎,黄铜矿等硫化物呈脉状、网状、不规则团块状、中粗粒稠密浸染状灌入到碎裂石英脉及碎裂岩的裂隙中,硫化物含量普遍为 $10\times 10^{-2}\sim 20\times 10^{-2}$,局部达 60×10^{-2} 以上,Cu 品位为 $1\times 10^{-2}\sim 10\times 10^{-2}$,是主成矿阶段(图 5)。

(3)石英-碳酸盐脉阶段:在局部地段,以石英-方解石细脉(1~10 cm)叠加于前两个阶段的矿化之上,是矿化接近尾声的标志。Cu 品位一般小于 0.3×10^{-2} 。

3 样品及分析方法

本次研究工作共采集 32 件各类岩石、矿石样品进行稀土元素分析。矿区的样品主要采自于 18 号矿体及其围岩。为便于对比研究,还对矿区外围的 33、34 号矿脉进行了系统采样。在矿体中采集的样品主要有石英脉、黄铜矿化硅质碎裂岩、块状硫化物矿石等。围岩的样品包括片岩、混合岩中的花岗质脉体、片麻岩、大理岩和千枚岩。根据薄片鉴定结果,选择有代表性的样品进行了稀土元素分析。

样品加工在中国科学院地球化学研究所实验室完成。石英和黄铁矿单矿物用常规方法在双目镜下人工挑纯,经 X 粉末衍射证明纯度达 99% 以上。稀土元素在长安大学测试中心测定,采用电感耦合等离子体光谱法(ICP-MS),分析精度优于 5%。

4 稀土元素分析结果及地球化学特征

32 件岩石、矿物稀土元素分析结果列于表 1,图 6 是这些样品球粒陨石标准化后得到的稀土元素配

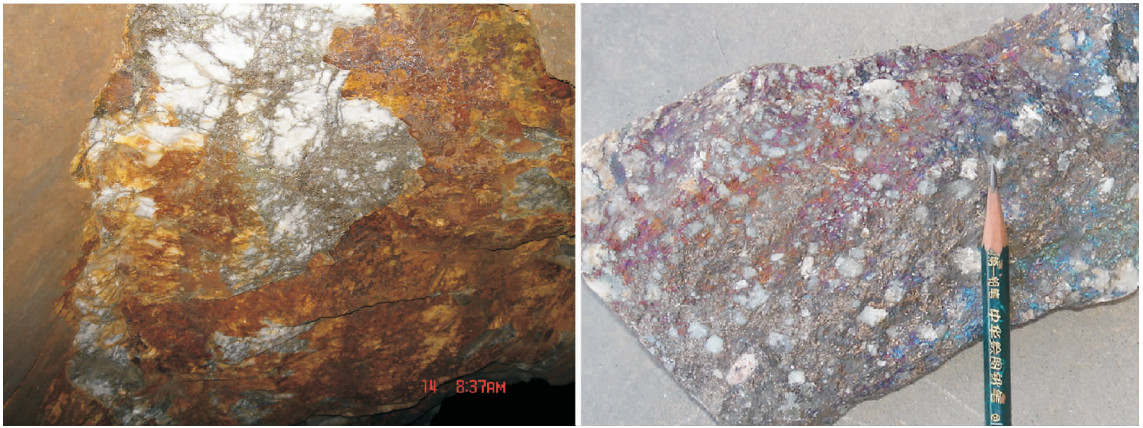


图 5 硫化物-碎裂石英脉阶段的块状铜矿石

Fig.5 Sulfide-fragmentation phase of the massive quartz veins copper ore

分模式,其地球化学特征如下:

岩浆岩:本区的闪长岩和辉绿岩均呈脉状分布。从图 6-a 中可以看出闪长岩和辉绿岩稀土元素的含量都很高,其中闪长岩的 $\sum \text{REE}$ 为 134.06×10^{-6} ,辉绿岩的 $\sum \text{REE}$ 为 222.86×10^{-6} ; 二者的 LREE/HREE 分别为 8.37 和 9.36, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别为 9.90 和 10.36,表明两者轻重稀土元素发生了明显的分异作用,轻稀土元素相对富集; $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 分别为 2.53 和 3.21, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 分别为 3.01 和 2.44,显示两种岩石的轻重稀土元素都发生了分异作用。 δEu 分别为 0.83 和 0.811,具有弱的铕负异常; δCe 分别为 1.12 和 1.08,基本无铈异常。闪长岩和辉绿岩的配分模式相似(图 6-a)。其配分曲线都为轻稀土相对富集、重稀土相对亏损的右倾型特征。两类样品的配分模式相似,反映它们可能为同源岩浆演化的产物^[3]。

片岩:样品的稀土总量为 $128.83 \times 10^{-6} \sim 294.90 \times 10^{-6}$,稀土元素的配分曲线呈轻稀土元素相对富集($\text{LREE}/\text{HREE}=7.59 \sim 11.43$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=7.92 \sim 16.86$),左陡倾($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=3.23 \sim 3.30$),而右平缓($(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.44 \sim 3.20$)的右倾型。 $\delta \text{Eu}=0.56 \sim 0.82$,有强的铕负异常, $\delta \text{Ce}=1.01 \sim 1.09$,基本无铈异常(图 6-b)。

混合岩的花岗质脉体:其 $\sum \text{REE}=8.74 \times 10^{-6} \sim 68.70 \times 10^{-6}$ 。 $\text{LREE}/\text{HREE}=0.55 \sim 0.89$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.24 \sim 0.92$,表明轻重稀土元素有明显的分异作用,重稀土元素相对富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.83 \sim 1.33$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.51 \sim 1.76$,显示轻、重稀土元素有弱分异作用。 $\delta \text{Eu}=0.11 \sim 0.74$,有强的铕负异常, $\delta \text{Ce}=0.84 \sim 0.95$,弱铈异常。稀土元素配分曲线为左倾型,有铕负异常(图 6-c)。

片麻岩:3 件样品都产自矿体附近,镜下鉴定为黑云斜长片麻岩。样品的稀土总量为 $90.06 \times 10^{-6} \sim 234.77 \times 10^{-6}$,稀土元素的配分模式特点是轻稀土元素相对富集的右倾型($\text{LREE}/\text{HREE}=5.34 \sim 9.74$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=4.63 \sim 15.13$)。左陡倾($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.46 \sim 3.90$),右平缓($(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.29 \sim 3.13$)。 $\delta \text{Eu}=0.42 \sim 0.65$,有强的铕负异常, $\delta \text{Ce}=1.03 \sim 1.09$,基本无铈异常(图 6-d)。与片岩稀土配分曲线相似。

18-2 铜矿体的矿石:从稀土配分曲线图(图 6-e)可以明显观察到配分模式的差异。2-B20 样品的 $\sum \text{REE}=84.11 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=6.11$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=6.47$ 表明轻重稀土元素有明显的分异作用,轻稀土元素相对富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=2.61$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.16$,显示轻重稀土元素有弱的分异作用。 $\delta \text{Eu}=0.56$,有强的铕负异常, $\delta \text{Ce}=1.02$,基本无铈异常。其余矿石样品稀土元素总量变化较大($\sum \text{REE}=2.05 \times 10^{-6} \sim 139.60 \times 10^{-6}$)。 $\text{LREE}/\text{HREE}=0.06 \sim 0.47$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.01 \sim 0.26$,表明轻重稀土元素有明显的分异作用,重稀土元素相对富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.19 \sim 1.57$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.12 \sim 0.43$,显示重稀土元素有强的分异作用,而轻稀土分异作用强弱不一。 $\delta \text{Eu}=0.45 \sim 0.85$,有强铕负异常, $\delta \text{Ce}=0.67 \sim 0.90$,具有弱铈异常。稀土元素配分曲线呈左倾(图 6-e)。

18-4 铜矿体的矿石:样品的稀土元素总量低, $\sum \text{REE}=6.87 \times 10^{-6} \sim 40.56 \times 10^{-6}$,稀土元素的配分模式特点是重稀土元素相对富集的左倾型($\text{LREE}/\text{HREE}=0.13 \sim 0.96$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.06 \sim 0.50$)。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.51 \sim 1.92$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.10 \sim 0.32$,显示其重稀土元素

表 1 包尔图铜矿床岩石稀土元素组成分析结果($\mu\text{g/g}$)
Table 1 REE and Cu content of rocks and ores from various copper ore bodies in Baertu ($\mu\text{g/g}$)

岩性	岩浆岩		片岩										片麻岩		矿石	
	2-B9	2-B13	2-B2	ZK-1	4-b8	2-B4	2-B6	2-B16	2-B17	2-B19	2-b2	2-b13	2-B7	2-B15		4-b16
样品名称	灰绿岩	闪长岩	混合岩基 体黑云片 岩	黑云 母片岩	黑云斜 长片岩	混合岩 花岗岩 脉体	混合岩 花岗岩 脉体	混合岩 花岗岩 脉	混合岩 花岗岩 脉体	混合岩 花岗岩 脉体	混合岩 花岗岩 脉体	混合岩花 岗质脉体	黑云斜 长片麻 岩	黑云斜 长片麻 岩	斜长片麻 岩	灰色碎裂石 英脉
La	40.60	21.72	24.13	24.97	58.02	2.77	1.01	1.52	5.29	1.38	0.61	3.67	20.70	49.63	15.20	0.65
Ce	94.80	55.78	55.42	53.21	127.20	5.38	2.33	2.23	11.73	2.84	1.12	5.69	48.42	102.10	34.54	1.37
Pr	10.05	6.11	5.52	5.76	13.15	0.81	0.36	0.23	1.56	0.42	0.15	0.81	5.02	9.76	3.87	0.23
Nd	45.82	29.23	24.34	25.22	59.85	3.69	2.00	1.17	7.70	2.17	0.83	3.53	22.34	42.28	17.66	1.09
Sm	7.95	5.40	4.68	4.87	11.06	1.31	1.08	0.52	3.84	1.04	0.44	0.95	4.52	8.01	3.89	0.38
Eu	2.14	1.50	1.18	1.07	1.90	0.28	0.13	0.20	0.18	0.28	0.21	0.32	0.99	1.13	0.67	0.16
Gd	7.96	5.50	3.94	3.58	9.19	1.51	1.80	1.21	6.30	1.79	1.02	1.12	4.83	8.57	3.54	0.90
Tb	0.85	0.59	0.65	0.61	1.11	0.25	0.43	0.23	1.34	0.36	0.17	0.16	0.60	0.97	0.57	0.20
Dy	5.34	3.70	4.63	4.04	6.35	1.65	4.03	2.11	11.70	3.39	1.56	1.36	4.12	5.90	4.05	1.70
Ho	0.91	0.62	0.79	0.69	0.98	0.30	0.80	0.38	2.14	0.66	0.29	0.22	0.73	0.91	0.72	0.39
Er	3.05	1.98	2.53	2.26	3.11	0.97	2.83	1.26	7.28	2.41	1.06	0.77	2.49	2.73	2.44	1.45
Tm	0.37	0.23	0.30	0.27	0.34	0.15	0.40	0.15	0.98	0.32	0.14	0.09	0.32	0.30	0.38	0.22
Yb	2.65	1.48	2.06	2.01	2.33	1.07	2.84	1.11	7.76	2.12	1.01	0.52	2.27	2.22	2.22	1.71
Lu	0.38	0.22	0.29	0.28	0.32	0.17	0.39	0.13	0.91	0.30	0.14	0.08	0.32	0.27	0.30	0.21
LREE	201.36	119.75	115.27	115.10	271.18	14.24	6.91	5.87	30.29	8.12	3.35	14.97	101.99	212.91	75.85	3.88
HREE	21.50	14.31	15.19	13.73	23.73	6.07	13.52	6.58	38.40	11.33	5.39	4.32	15.69	21.86	14.21	6.76
Σ REE	222.86	134.06	130.46	128.83	294.90	20.31	20.44	12.45	68.70	19.45	8.74	19.29	117.68	234.77	90.06	10.64
LR/HR	9.36	8.37	7.59	8.38	11.43	2.35	0.51	0.89	0.79	0.72	0.62	3.47	6.50	9.74	5.34	0.57
(La/Yb) _N	10.36	9.90	7.92	8.38	16.86	1.75	0.24	0.92	0.46	0.44	0.40	4.80	6.15	15.13	4.63	0.26
(La/Sm) _N	3.21	2.53	3.25	3.23	3.30	1.33	0.59	1.84	0.87	0.83	0.88	2.42	2.88	3.90	2.46	1.08
(Gd/Yb) _N	2.44	3.01	1.55	1.44	3.20	1.14	0.51	0.88	0.66	0.68	0.81	1.76	1.72	3.13	1.29	0.43
δ Eu	0.81	0.83	0.82	0.75	0.56	0.60	0.28	0.74	0.11	0.63	0.91	0.95	0.65	0.42	0.56	0.78
δ Ce	1.08	1.12	1.09	1.01	1.05	0.84	0.90	0.80	0.95	0.87	0.84	0.75	1.09	1.03	1.04	0.83

续表 1

岩性	18-2 矿体矿石				18-4 矿体矿石				33 矿体矿石			34 矿体矿石					
	2-B5	2-B8	2-B20	2-B22	2-B23	4-B4	4-B5	4-B9	4-B17	4-B22	4-B23	12055.00	12086.00	12420.00	12451.00	12479.00	
样品名称	黄褐色 碎裂石 黄脉	黄褐色 碎裂石 黄脉	块状硫化物 矿石 脉	白色 石英 脉	黄铜矿 化碎裂 岩矿石	黄铜矿 化石英 脉矿石	黄铜矿 化石英 脉矿石	黄铜矿 化碎裂 岩矿石	块状黄铜矿 矿石	块状硫化物 矿石	黄铁矿 碎裂 石英脉	烟灰色 黄铁矿 石英脉	烟灰色 黄铁矿 石英脉	孔雀石化 碎裂 石英脉	孔雀石化 碎裂 石英脉	碎裂石英 脉矿石	碎裂石英 脉矿石
La	6.44	2.77	14.63	0.07	0.32	0.28	0.37	0.74	0.57	0.32	3.85	0.10	0.14	0.17	0.47	1.06	
Ce	13.34	6.50	32.72	0.10	0.84	0.56	0.74	1.50	1.23	0.74	8.20	0.14	0.26	0.40	1.29	2.65	
Pr	1.58	0.83	3.73	0.02	0.15	0.08	0.09	0.18	0.17	0.11	1.00	0.02	0.04	0.06	0.23	0.38	
Nd	7.59	4.59	16.98	0.09	1.20	0.47	0.42	0.85	0.97	0.70	5.06	0.10	0.19	0.41	1.78	2.74	
Sm	2.58	2.58	3.52	0.05	1.04	0.35	0.13	0.24	0.43	0.34	1.47	0.05	0.08	0.21	1.43	1.64	
Eu	0.78	0.90	0.69	0.02	0.38	0.15	0.04	0.06	0.20	0.10	0.34	0.02	0.03	0.13	0.78	0.57	
Gd	7.20	10.79	4.07	0.08	4.18	0.99	0.20	0.29	0.72	0.77	2.05	0.14	0.11	0.35	4.78	4.87	
Tb	1.78	2.86	0.48	0.04	1.26	0.39	0.14	0.13	0.37	0.41	0.55	0.09	0.15	0.13	1.39	1.41	
Dy	19.33	33.18	3.13	0.39	15.07	4.37	1.56	1.35	4.23	4.48	5.57	1.00	1.57	1.27	15.16	16.12	
Ho	4.24	7.36	0.52	0.09	3.51	0.96	0.35	0.30	1.00	0.92	1.20	0.20	0.31	0.26	3.31	3.61	
Er	16.18	28.96	1.71	0.40	14.83	3.64	1.32	1.12	4.18	3.27	4.79	0.64	0.99	0.99	13.09	14.33	
Tm	2.11	3.83	0.21	0.06	2.15	0.46	0.16	0.15	0.61	0.39	0.63	0.07	0.11	0.14	1.78	1.95	
Yb	16.77	31.08	1.53	0.57	20.34	3.30	1.23	1.12	5.73	2.76	5.21	0.45	0.71	1.09	15.09	16.83	
Lu	1.79	3.31	0.18	0.08	2.53	0.31	0.12	0.11	0.75	0.24	0.64	0.04	0.07	0.13	1.50	1.72	
LREE	32.30	18.18	72.28	0.34	3.92	1.89	1.79	3.57	3.57	2.30	19.92	0.43	0.73	1.38	5.98	9.05	
HREE	69.40	121.37	11.83	1.71	63.87	14.41	5.07	4.56	17.57	13.25	20.64	2.62	4.02	4.35	56.06	60.84	
? REE	101.70	139.55	84.11	2.05	67.79	16.30	6.87	8.13	21.14	15.55	40.56	3.05	4.75	5.73	62.04	69.88	
LR/HR	0.47	0.15	6.11	0.20	0.06	0.13	0.35	0.78	0.20	0.17	0.96	0.17	0.18	0.32	0.11	0.15	
(La/Yb) _N	0.26	0.06	6.47	0.08	0.01	0.06	0.20	0.45	0.07	0.08	0.50	0.15	0.14	0.10	0.02	0.04	
(La/Sm) _N	1.57	0.68	2.61	0.91	0.19	0.51	1.73	1.92	0.83	0.60	1.65	1.26	1.14	0.51	0.21	0.41	
(Gd/Yb) _N	0.35	0.28	2.16	0.12	0.17	0.24	0.13	0.21	0.10	0.23	0.32	0.24	0.13	0.26	0.25	0.24	
δEu	0.52	0.45	0.56	0.85	0.48	0.73	0.83	0.68	1.09	0.58	0.59	0.80	0.88	1.50	0.82	0.57	
δCe	0.96	1.00	1.02	0.67	0.90	0.88	0.93	0.94	0.93	0.92	0.96	0.68	0.82	0.91	0.91	0.98	

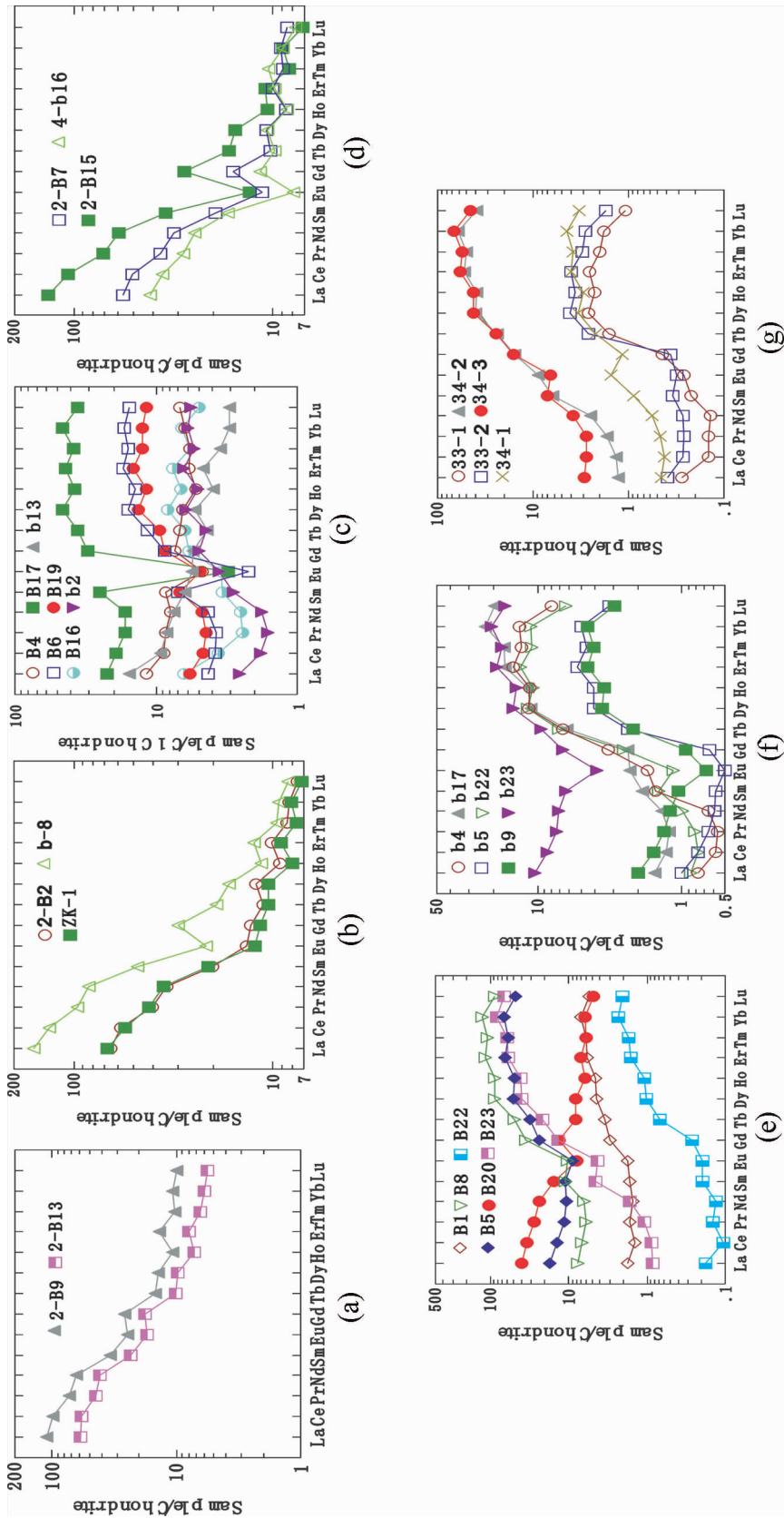


图6 包尔图矿床岩石及矿石的稀土元素配分模式(样品编号同表1)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns of rocks and ores from some copper ore bodies in Baocun

强分异,轻稀土元素分异不一。 $\delta \text{Eu}=0.58\sim 0.83$,除块状黄铜矿矿石(4-b17)无铕负异常外,其他样品都有强的铕负异常, $\delta \text{Ce}=0.88\sim 0.96$,有弱铈异常(图 6-f)。

33、34 号铜矿体的矿石:共 5 件样品,稀土元素总量低,变化于 $3.05\times 10^{-6}\sim 69.88\times 10^{-6}$ 。LREE/HREE=0.11~0.32, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.02\sim 0.15$ 表明轻重稀土元素有明显的分异作用,重稀土元素相对富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.51\sim 1.26$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.13\sim 0.26$,显示重稀土元素有强的分异作用,轻稀土元素分异作用强弱不一。 $\delta \text{Eu}=0.57\sim 0.88$,有强的铕负异常, $\delta \text{Ce}=0.68\sim 0.96$,有弱铈异常。稀土元素配分曲线呈左倾(图 6-g)。

5 讨论

5.1 矿床成因

矿区的阿尔彼什麦布拉克组为一套浅海相复理石建造的碎裂变质岩,在区域热变质作用下形成递增变质带。轴部第一亚组片麻岩和混合岩由富含中酸性火山碎屑岩变质而成。区域研究表明,中酸性火山碎屑岩的铜背景值较高;南翼第二亚组绿泥石化、硅化千枚岩类,具有铜异常元素组合,具备一定的物质基础^①。从图 6-b 及 6-d 可以看出:黑云母片岩、黑云斜长角闪片麻岩、混合岩的基体都有相似的稀土元素配分曲线($\sum \text{REE}$ 高,轻稀土富集,重稀土相对亏损的右倾型,具有左陡右缓,明显的铕异常)。表明在变质过程中,稀土元素的化学性质比较稳定。

尽管采自不同矿体的黄铜矿化硅质碎裂石英脉、块状硫化物矿石及白色石英脉的稀土总量变化较大,但它们的稀土特征相近,具有铕负异常,稀土元素配分模式曲线一致,表明它们具有共同的来源和相似的成因机制^[14]。稀土元素特征暗示矿石沉淀的过程中稀土元素发生明显的分异,重稀土富集,而矿石中稀土元素特征可以代表初始成矿流体中的稀土元素特征^[15]。图解中有明显不同的两组稀土配分模式,一组是轻重稀土元素有明显的分异作用,轻稀土元素相对富集 ($\sum \text{REE}=84.11\times 10^{-6}$, LREE/HREE=6.11, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=6.47$);另一组是轻重稀土元素有明显的分异作用,重稀土元素相对富集 ($\sum \text{REE}=2.05\times 10^{-6}\sim 139.60\times 10^{-6}$, LREE/HREE=0.06~

0.47, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.01\sim 0.26$)。后者更具普遍性。

Y 和 Ho 两个元素具有相同的离子电价,其 8 次配位的离子半径也几乎完全相同。因此这两个元素在许多地球化学环境中具有相似的地球化学行为。Bau and Dulski(1996)^[16]认为 Y/Ho 值在不同类型的火成岩、硅酸盐碎屑沉积及球粒陨石中没有明显变化,球粒陨石中 Y/Ho 为 28^[17],但在水溶液体系中的化学性质发生分异。18 号矿体中 Y/Ho 的值为 26.68~31.73,变化于 26~36,接近陨石的比值,表明其均为岩浆成因。从上面的分析得知铜矿床形成过程中应该有岩浆热液成分加入。

5.2 负铕异常和弱负铈异常

Eu 异常产生与其自然界可以不同价态存在有关。当 Eu 在还原条件下主要以 Eu^{2+} 存在时,由于电荷数的减少和离子半径相对增大,使 Eu 表现出不同于其他三价稀土元素的地球化学行为,在地质地球化学作用过程中与其他稀土元素发生分离,形成 Eu 的异常。矿石产生 Eu 异常的原因可能有两种:一种是在矿石沉淀时从成矿热液中继承了相对贫 Eu 的特征;另一种是在矿石形成后后续的变质变形或流体作用导致了 Eu 与相邻稀土元素分异。由于稀土元素具有非常接近的地球化学行为,在地质地球化学过程中常作为一个整体出现,故后期的变质变形作用很难使岩(矿)石的稀土配分模式发生大的改变,但一般来说离子半径较大的轻稀土元素相对重稀土而言应当更容易被流体带出岩石,使岩(矿)石的稀土配分模式向着 LREE 相对亏损的方向发展。

对于 Eu 而言,无论是在矿石还是在围岩中,都表现明显的 Eu 负异常,具有较大离子半径和较小电荷的 Eu^{2+} 相对其他三价稀土显然更容易被流体带出矿石,从图 6 的所有稀土元素配分图解中推测矿石中 Eu 负异常可能是流体加入所致。岩石中 Eu 的负异常产生常常与斜长石的结晶有关(LREE 明显富集)。因斜长石大量的晶出,导致残余熔浆中形成明显的负异常,从现场发现,围岩中能看到斜长石晶体,这与稀土元素特征吻合。

Ce 异常的产生主要与其在氧化环境下以 Ce^{4+} 形式出现有关。Ce 电荷数的增加和半径的减小,使之与相邻元素之间地球化学行为上表现一定的差异,产生 Ce 与相邻元素之间的分离,因而表现为

①新疆地质矿产开发局第三地质大队.新疆和硕县包尔图 18 号铜矿普查地质报告, 2006.

Ce 负异常或正异常。岩石或矿石颗粒表面对 Ce⁴⁺ 的吸附强度大于其他的三价稀土元素,因而可以排除由流体淋滤作用导致矿石 Ce 负异常的可能性。部分矿石中 Ce 的相对亏损,可能是成矿热液 Ce 相对亏损的反映。因此成矿热液的 Ce 相对亏损应与海水的加入有关^[18-20]。

本次系统地研究了岩体、围岩的矿物和矿石的稀土元素特征。闪长岩和辉绿岩有同样的稀土配分模式,与矿区的花岗岩不同,他们是两次不同岩浆侵入作用的产物。从现场观察得知,闪长岩和辉绿岩的侵入时间要晚。从图 6-d、6-e 和 6-f 中明显可以看出矿体的 LREE 比 HREE 要少,这可能是由于变质作用使 LREE 大量流失,因此推断本矿床是变质热液型铜矿床。

6 结 论

(1) 片岩、片麻岩和混合岩的稀土配分模式具有相似性,均为右倾,负铈异常,基本上无铈异常(部分岩石有很弱的负铈异常, $\delta\text{Ce}=0.83\sim 0.96$),差别在于稀土元素的总量和轻重稀土元素的分馏程度不同,暗示它们之间存在成因联系。

(2) 宏观上矿体的分布范围与构造蚀变带完全一致,断裂的产状也是矿体的产状,并且矿体切过所有地层并与地层高角度斜交。由于断裂主要切割背斜轴部,因而往往倾角较陡。断裂既是导矿构造也是容矿构造,从而为高温变质含矿热液的运移富集提供了容矿空间。

(3) 采自不同矿体、不同类型矿石样品虽然有两种明显不同的稀土配分模式,但它们大部分样品却显示出十分相似的稀土元素配分模式,即 ΣREE 较低,轻稀土相对亏损,重稀土相对富集的左倾型,具有强的负铈异常,表明包尔图铜矿床可能是含矿热液淋滤、汲取围岩富集而成。

参考文献(References):

[1] Whitney Philip R, Olmsted James F. Rare earth element metasomatism in hydrothermal systems: The Willsboro - Lewis wollastonite ores, New York, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(17):29-65.

[2] 杨学明, 杨晓勇, 陈天虎, 等. 白云鄂博稀土碳酸岩的地球化学特征[J]. *中国稀土学报*, 1999, 17(4):289-295.

Yang Xueming, Yang Xiaoyong, Chen Tianhu, et al. Geochemical characteristics of a carbonatite dyke rich in rare earths from Bayan

Obo, China[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 1999, 17 (4):289-295 (in Chinese with English abstract).

[3] Michard A. Rare earth element systematics in hydrothermal fluids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:745-750.

[4] Fang Weixuan, Yang shefeng, Liu Zhengtao, et al. Geochemical characteristics and significance of major elements, trace elements and REE in mineralized altered rocks of large-scale Tsagaan Suvarga Cu-Mo Porphyry Deposit in Mongolia [J]. *Journal of Rare Earths*, 2007, 25(6):759-769.

[5] Killick A M, Scheepers R. Controls to hydrothermal gold mineralization in the Witwatersberg Goldfield; situated in the floor to the south of the Bushveld Complex, South Africa [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 41:235-247.

[6] Jahn Bor-ming, Wu Fuyuan, Capdevila R, et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns; the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China[J]. *Lithos*, 2001, 59:171-198.

[7] Miguel Gaspar, Charles Knaack, Lawrence D Meinert, et al. REE in skarn systems: A LA-ICP-MS study of garnets from the Crown Jewel gold deposit [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2008, 72: 185-205.

[8] 闫升好, 张招崇, 王义天, 等. 新疆阿尔泰山南缘乔夏哈拉式铁铜矿床稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *矿床地质*, 2005, 25(1):25-33.

Yan Shenhao, Zhang Zhaochong, Wang Yitian, et al. REE geochemistry of Qiaoxiahala type Fe-Cu deposits in southern margin of Altay Mountains, Xinjiang, and its geological implications [J]. *Mineral Deposits*, 2005, 25(1): 25-33 (in Chinese with English abstract).

[9] 杨富全, 毛景文, 徐林刚, 等. 新疆蒙库铁矿床稀土元素地球化学及对铁矿化的指示[J]. *岩石学报*, 2007, 23(10):2443-2456.

Yang Fuquan, Mao Jingwen, Xu Lingang. REE geochemistry of the Mengku iron deposit, Xinjiang, and its indication for iron mineralization [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(10) 2443-2456 (in Chinese with English abstract).

[10] 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 等. 新疆哈密黄山地区铜镍硫化物矿床的稀土元素特征及意义[J]. *岩石学报*, 2004, 20(4):935-948.

Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, et al. REE characteristics of Cu-Ni sulfide deposits in the Hami area, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20 (4): 935-948 (in Chinese with English abstract).

[11] 王志良, 毛景文, 杨建民, 等. 新疆和静乔霍特铜矿床成矿流体地球化学特征[J]. *地球化学*, 2004, 25(5):549-554.

Wang Zhiliang, Mao Jianwen, Yang Jianmin, et al. Geochemistry of ore-forming fluids in the Qiaohuote Copper Deposit of Hejing County, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25(5): 549-554 (in Chinese with English abstract).

[12] 张连昌, 万博, 李文铅, 等. 新疆吐哈盆地南缘铜矿含斑岩的地球化学形成环境[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1):225-235.

Zhang Lianchang, Wan Bo, Li Wenqian, et al. Geochemistry and

- tectonic setting of copper-bearing porphyries on the southern margin of Tula basin, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 935-948(in Chinese with English Abstract).
- [13] Yang F Q H, Pirajno F, Ma B Y, et al. The Jiashan syenite in northern Hebei: A record of lithospheric thinning in the Yanshan intracontinental orogenic belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29:619-636.
- [14] Frietsch R, Perdahl J A. Rare earth elements in apatite and magnetite in Kiruna-type iron ores and some other iron ore types [J]. *Ore Geology Reviews*, 1995, 9:489-510.
- [15] 杨耀民, 涂光炽, 胡瑞中. 迤纳厂稀土铁铜矿床稀土元素地球化学[J]. *矿物学报*, 2004, 24(3):301-308.
Yang Yaomin, Tu Guangzhi, Hu Ruizhong. REE geochemistry of Yinachang Fe-Cu-REE deposit in Yunnan Province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3):301-636(in Chinese with English abstract).
- [16] Bau M, Dulski P. Anthropogenic origin of positive gadolini-umanomalies in river waters[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1996, 143: 245-255.
- [17] Anders E, Greves N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53:197-214.
- [18] 丁振举, 姚书振, 刘丛强, 等. 东沟坝多金属矿床沉积成矿特征的稀土元素地球化学示踪[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4):792-798.
Ding Zhenju, Yao Shuzhen, Liu Congqiang, et al. The characteristics of exhalation-sedimentary deposit of Donggouba polymetal deposit: Evidence from ore's REE composition [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4):792-798 (in Chinese with English abstract).
- [19] 廖启林, 王京彬, 赖健清. 新疆北部中-大型金、铜矿床的基本成矿特征[J]. *地质论评* 200147(6):625-636.
Liao Qilin, Wang Jingbin, Lai Jianqing. Basic metallogenetic characters of the large and medium-scale gold and copper deposits in Northern Xinjiang [J]. *Geological Review*, 2001, 47 (6): 625-636(in Chinese with English abstract).
- [20] 宋会侠, 刘玉琳, 屈文俊, 等. 新疆包古图斑岩铜矿床地质特征[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8):1981-1988.
Song Huixia, Liu Yulin, Qu Wenjun, et al. Geological characters of Baogutu porphyry copper deposit in Xinjiang, NW China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23 (8):1981-1988 (in Chinese with English abstract).

REE geochemical Character of the Baoertu copper deposit in Xinjiang and its geological significance

PANG Xu-cheng^{1,2}, ZHU Hao-feng¹, HU Rui-zhong², ZONG Jing¹

(1. College of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2. Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: Located on the edge of the metamorphic belt formed by paleo-Kumishi ocean subduction, the Baoertu copper deposit is controlled by fault structures. The wall rocks are composed of a set of medium-deep grade metamorphic rocks, and REE geochemistry shows that their Σ REE content is high, with LREE/HREE being 2.46~16.86, and there exists obvious differentiation between LREE and HREE, with the enrichment of LREE relative to HREE and the existence of negative Eu anomaly. The REE patterns assume right inclination. By comparison, the ores have relatively low Σ REE content, with LREE/HREE being 0.06~0.97, and show significant differentiation between LREE and HREE characterized by relative enrichment of HREE. The REE patterns show left inclination, similar to things of the leucosome of migmatite. These REE characteristics suggest that the ore-forming process of the Baoertu copper deposit was related to hybridization. Combined with the characteristics of the ore field geology, this paper holds that the Baoertu copper deposit is genetically of the metamorphic hydrothermal type.

Key words: rare earth elements; geochemical characteristics; hybridization; Baoertu copper deposit; Xinjiang

About the first author: PANG Xu-cheng, male, born in 1963, doctor, professor, long engages in the study of mineral resource prospecting and exploration and ore geology; E-mail: jpxc@hpu.edu.cn.