

Study on the Geological and Geochemical Characteristics of Bofang Copper Deposit, Hunan Province

Chao Ge^{1,2}, Yongjun Shao^{1,2*}, Zhongfa Liu^{1,2}, Yuzhou Feng^{1,2}, Jian Li³, Zeyou Song³

¹Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha Hunan

²School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan

³Institute of Hunan Academy of Geological Science, Changsha Hunan

Email: 865578447@qq.com, *shaoyongjun@126.com

Received: Jul. 21st, 2017; accepted: Aug. 9th, 2017; published: Aug. 15th, 2017

Abstract

Bofang copper deposit is located in the intersection of Leiyang-Linwu south-north trending tectonic belt and Hengyang fault basin, which belongs to the superimposed part of different geological structure. Based on the macro geological characteristic, petrographic and geochemical analysis, it is thought that the Shenhuangshan group and F₂₂ fracture play important roles to the mineralization. It turned out that chalcocite ore not only participated in the mineralization but also offered part of the ore-forming materials. It is indicated that copper body is formed by the superimposition and alteration mineralization of underground geothermal brine. Bofang copper deposit belongs to sedimentation-reworked deposit.

Keywords

Geological Characteristics, Geochemical Characteristics, Ore Deposit Genesis, Bofang Copper Deposit, Sandstone-Type Copper Deposit

湖南柏坊铜矿床地质地球化学特征研究

葛超^{1,2}, 邵拥军^{1,2*}, 刘忠法^{1,2}, 冯雨周^{1,2}, 李剑³, 宋泽友³

¹中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南 长沙

²中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙

³湖南省地质科学院, 湖南 长沙

Email: 865578447@qq.com, *shaoyongjun@126.com

收稿日期: 2017年7月21日; 录用日期: 2017年8月9日; 发布日期: 2017年8月15日

*通讯作者。

文章引用: 葛超, 邵拥军, 刘忠法, 冯雨周, 李剑, 宋泽友. 湖南柏坊铜矿床地质地球化学特征研究[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(4): 525-535. DOI: 10.12677/ag.2017.74054

摘要

柏坊铜矿位于耒阳临武南北向褶皱带与衡阳断陷盆地的交切部位,属不同构造迭加复合部位。本文对矿区宏观地质特征,岩矿石岩相学特征、地球化学特征进行分析,认为区内下白垩统神皇山组(K_{1s})地层及F₂₂断裂构造对成矿有十分重要的作用,砂岩参与到了辉铜矿矿石的成矿作用过程中并提供了部分的成矿物质,铜矿体形成后还受到了地下热卤水的改造作用,并认为该矿床属于沉积-改造型铜矿床。

关键词

地质特征, 地球化学特征, 矿床成因, 柏坊铜矿床, 砂岩型铜矿

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

柏坊铜矿床位于衡阳盆地西南缘,由柚子塘和铜鼓塘两个矿段组成,矿体主要产于上白垩统神皇山组(K_{1s})浅色砂岩层、中上石炭统壶天群(C₂₊₃)灰岩以及F₂₂断裂破碎带内。前人曾对柏坊铜矿进行过相关研究,得到矿区方解石中 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-1.7\text{‰}\sim 2.9\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{smow}}$ 值为 $11.8\text{‰}\sim 19.7\text{‰}$; δD 值为 $-67.3\text{‰}\sim -131.6\text{‰}$,显示热液的多源性;硫化物中辉铜矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-31.8\text{‰}\sim 2.9\text{‰}$,黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.1\text{‰}\sim +2.9\text{‰}$ [1];矿物包裹体均一温度为 236.3°C [2],总体上虽然在成矿物理化学条件、成矿物质来源、成矿流体来源、矿床成因等方面都进行了研究,初步建立了找矿方向,但研究深度总体不够,对矿区内紫红色砂岩、浅色砂岩及辉铜矿尚未进行过微量元素的深入研究,对含矿热液的来源尚没有准确地判定。

2. 区域地质背景

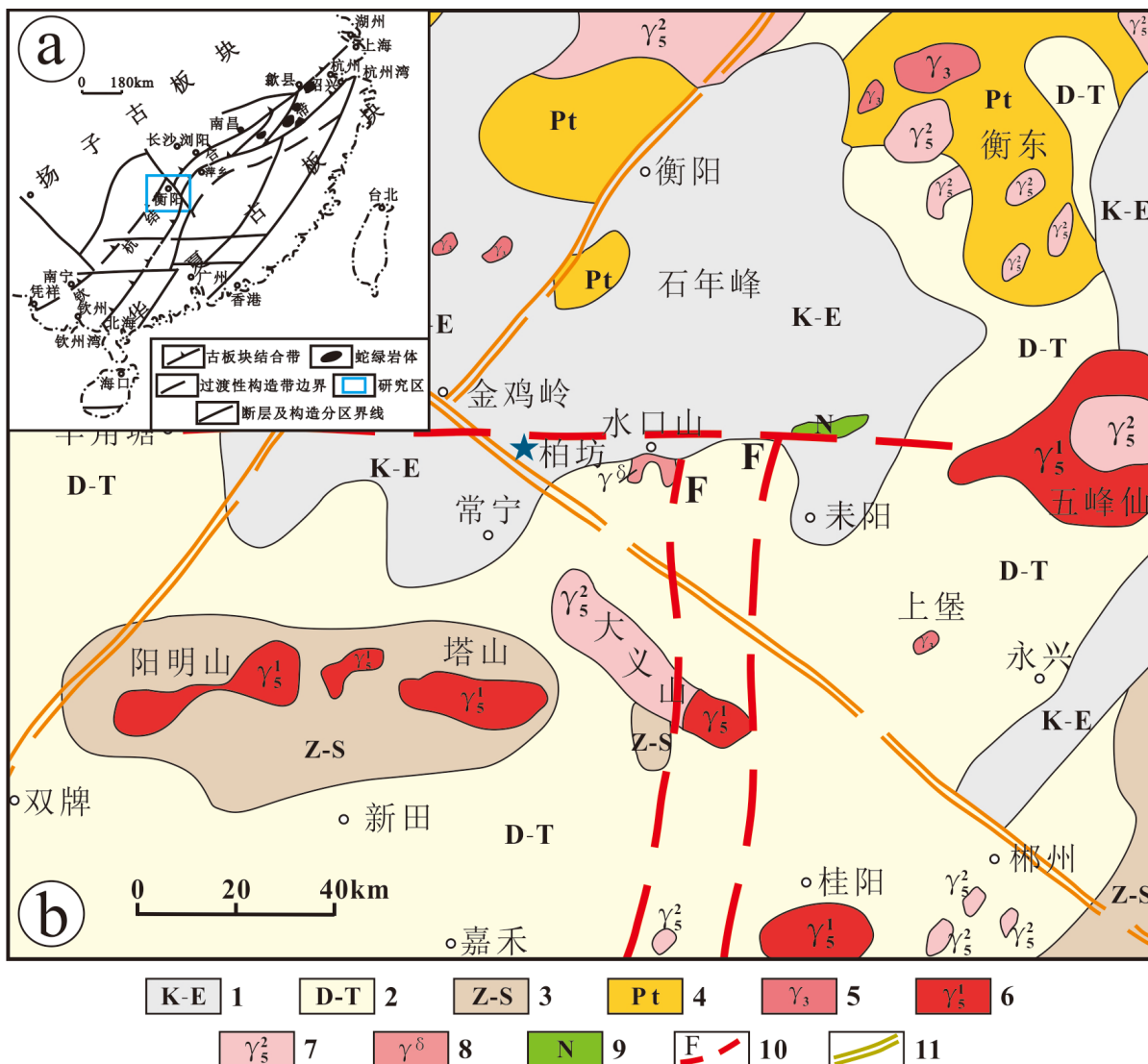
柏坊铜矿床位于衡阳盆地南缘白垩系红色碎屑岩层与古生代接触边部,大地构造位置位于扬子板块与华夏板块结合部位——钦杭成矿构造带中段(图1(a))。区域上位于衡阳盆地与耒阳临武南北向构造的交切部位,是不同方向构造叠合复合部位[3] (图1(b))。

3. 矿床地质特征

3.1. 矿区地质特征

柏坊铜矿床出露的地层从老至新包括石炭系、二叠系、白垩系和第四系。下石炭统包括孟公坳组(C_{1m})、石碇子组(C_{1s})、测水组(C_{1c})以及梓门桥组(C_{1z}),为一套浅海-滨海的碳酸盐-砂页岩夹煤的建造,岩性以灰色、灰黑色灰岩、白云质灰岩和砂质页岩为主,总厚度大于500 m [5]。中上石炭统壶天群(C₂₊₃)主要由灰白、肉红色块状白云质灰岩与白云岩组成,铜鼓塘矿段IV及V号矿体赋存其中,地层出露厚度360~600 m。二叠系(P)在本区广泛出露,由深灰、灰黑色灰岩、硅质岩和灰白色砂质页岩及煤系地层组成。下白垩统神皇山组(K_{1s})岩性多为红色或紫色砂岩、粉砂岩或页岩,统称红层,与二叠系角度不整合接触,是本区砂岩型铜矿的主要赋矿地层,柏坊铜矿区的大部分砂岩型铜矿均产于白垩系地层中。

矿区内构造较复杂,褶皱构造发育。矿区东部有杨家湾背斜,是矿区的主褶皱构造。次级褶皱构造



1. 白垩系 - 第三系; 2. 泥盆系 - 三叠系; 3. 震旦系 - 志留系; 4. 元古代基; 5. 加里东期花岗岩; 6. 印支期花岗岩; 7. 燕山期花岗岩; 8. 花岗闪长岩; 9. 玄武岩; 10. 转换断层; 11. B 型俯冲带

Figure 1. Geotectonic location map (a) and regional geological map (b) of the Bofang copper deposit
图 1. 柏坊铜矿床大地构造位置图(图(a))及区域地质图(图(b)) (图(a)据[4]修改; 图(b)据[1]修改)

从北至南有憩山岭背斜、柏坊向斜和铜鼓塘倒转向斜。另外，白垩系红层中尚发育一些短轴背、向斜构造，产状平缓，轴向有南北向、东西向两组。矿区西部与西南部红层为平缓的单斜构造。F₂₂ 断裂构造位于铜鼓塘倒转向斜南翼，倾向南，倾角变化大，为矿区内重要的控矿构造[6]。

矿区南见有 6 个小岩体，呈串珠状沿北西方断续出露长 1400 余米，地表见倾向北东，倾角 45°~75°。侵位于上古生界石炭系地层中，单个岩体小，出露面积 100~4000 m²。岩性为花岗闪长斑岩，岩石呈灰白色、棕色，具斑状构造，斑晶以长石和角闪石为主，次为黑云母，基质以石英为主，呈显微花岗结构。

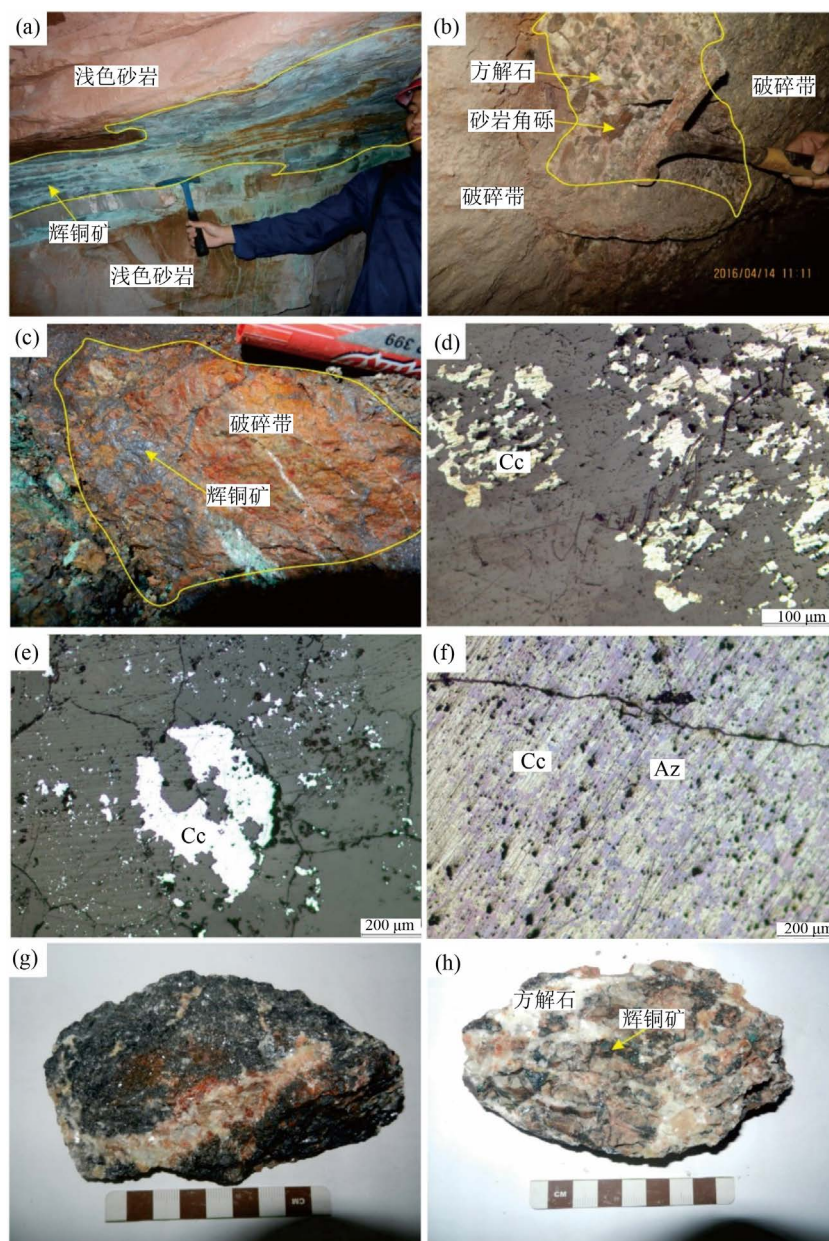
3.2. 矿体地质特征

柏坊铜矿主要由四个隐伏矿体组成，其产出空间位置不同，形态规模差异较大。主要矿体有 II 号、VI 号矿体，次为 IV 号、V 号矿体，主矿体的储量占全区的 72% [7]。矿体赋存于不同的构造空间，大致

展布方向为北西向。矿体埋藏最浅的距地表 10 米左右，深的达 230 米。

3.3. 矿石特征

柏坊铜矿的矿石类型主要有沉积砂岩型铜矿石、角砾岩型铜矿石和脉型铜矿石(图 2(a), 图 2(b), 图 2(c), 图 2(g), 图 2(h))。其中沉积砂岩型铜矿石表现为辉铜矿矿石呈层状、似层状、浸染状及脉状分布



(a): 产于断裂破碎带内的网脉状辉铜矿矿体; (b): 产于构造破碎带内浅色砂岩角砾中的辉铜矿, 其中砂岩角砾被方解石胶结; (c): 产于断裂破碎带内的网脉状辉铜矿矿体; (d): 呈它形粒状结构的辉铜矿(Cc); (e): 辉铜矿(Cc)被非金属矿物交代溶蚀呈港湾状; (f): 蓝铜矿(Az)与辉铜矿(Cc)呈文象状固溶体分离结构, 其中辉铜矿(Cc)被蓝铜矿(Az)交代; (g): 团块状辉铜矿矿石; (h): 浸染状辉铜矿矿石

Figure 2. Ore-type and microscopic photo of Bofang copper deposit

图 2. 柏坊铜矿床矿石类型及镜下特征

在白垩系砂岩及上石炭统壶天群灰岩中；角砾岩型铜矿石表现为断层破碎带内充填有构造角砾岩，角砾成分多为浅色砂岩及紫红色砂岩，亦可见壶天群硅化灰岩角砾，角砾多被方解石胶结，其中多充填有脉状、网脉状辉铜矿矿石；脉型铜矿石表现为破碎带中充填有脉状及网脉状辉铜矿矿石，破碎中内发育有方解石脉，脉壁不平直，局部呈膨大收缩，方解石脉中可见脉状、网脉状辉铜矿。

矿石矿物主要为辉铜矿和蓝铜矿，次有孔雀石、斑铜矿、赤铜矿，少量及微量黝铜矿、蓝辉铜矿、闪锌矿、辉银矿、黄铜矿、黄铁矿、自然银、方铅矿以及沥青铀矿等。区内矿石不但富铜，银含量也十分可观，铜品位一般大于 5%，银含量多在 100 g/t 以上[8]。

矿石结构主要有他形粒状结构、交代溶蚀结构、固溶体分离结构、包含结构、骸晶结构等(图 2(d), 图 2(e), 图 2(f))。

矿石构造主要有块状构造、浸染状构造、脉状及网脉状构造等(图 2(a), 图 2(b), 图 2(c), 图 2(g), 图 2(h))。

3.4. 围岩蚀变

区内的围岩蚀变较发育，主要类型有：碳酸盐化、孔雀石化、蓝铜矿化、硅化、褐铁矿化、重晶石化、褪色化及绢云母化等。碳酸盐化为区内最主要蚀变类型，广泛分布于破碎带中，表现为沿砂岩层间破裂面、切穿地层断裂并充填有方解石；褪色化在矿区内发育较为广泛，且常与碳酸盐化伴生在一起，它是由成矿期后期阶段热液作用产生，表现为在紫红色砂岩中的炭质和暗色矿物大量减少，导致围岩由紫红色褪变为灰白色等。

4. 微量元素地球化学

本次研究以矿区内 5 中段 IV 号矿体和 9 中段 V 号矿体为重点研究对象，选取紫红色砂岩(YZT-1, YZT-10, BF-9-25)、浅色砂岩(YZT-20, BF-10)和辉铜矿矿石(BF-9-17, BF-9-18)样品送广州澳实分析检测(广州)有限公司进行微量元素和稀土元素检测，测试仪器采用等离子体质谱仪(ICP-MS)，经密码样校验，分析误差小于 8%。

根据紫红色砂岩和浅色砂岩中铜含量的差异，将 7 件样品分别划分为辉铜矿矿石(铜含量大于 3000×10^{-6})、浅色矿化砂岩(铜含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 3000 \times 10^{-6}$)、紫红色矿化砂岩(铜含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 3000 \times 10^{-6}$)和紫红色无矿砂岩(铜含量小于 100×10^{-6}) 4 类。分别计算出 3 类砂岩及矿石中的微量元素平均含量及其浓集系数，列于表 1。

1) 砂岩中富集 Cu、Ag、As、Cd 等亲硫元素。亏损 Ta、Sc、Co、Ni、V 等亲石、亲铁元素，表明矿区内砂岩层有利于 Cu 等亲硫元素的初始富集，具有“矿源层”的特征[9]；辉铜矿矿石中 Cu 显著富集，Ag、Cd 等亲硫元素含量高(浓集系数 > 350)，为矿化指示元素。从辉铜矿矿石→紫红色矿化砂岩→紫红色无矿砂岩，Sb、Cd 平均含量也随着铜元素含量的降低而逐渐降低，与 Cu 含量变化呈正相关，以上特征反映铜富集成矿过程与中低温热液交代作用关系密切[10]。

2) 高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Th、Ti 平均含量随着辉铜矿矿石→紫红色矿化砂岩→紫红色无矿砂岩呈递增态势，含量在紫红色无矿砂岩中达到最高，为浅色砂岩的 1.1~2.5 倍，反映高场强元素随着铜的不断富集而逐渐减少，推测与强烈的水-岩作用有关[11]。在热液改造作用过程中，因 Zr 的强活动性，交代改造形成的矿物中 Zr/Hf 值更高[10]，在辉铜矿矿石与砂岩中，辉铜矿矿石中 Zr/Hf 值最高，达到 185.00，远高于砂岩内的 Zr/Hf 值，表明辉铜矿矿石经热液改造作用形成。Sr/Ba 值可以帮助判断沉积时水体的古盐度[12]，辉铜矿矿石、紫红色矿化砂岩及紫红色无矿砂岩中的 Sr/Ba 值均大于 1，表明沉积时水体的盐度较大，其中辉铜矿矿石中 Sr/Ba 值更是达到 24.27，远远高于砂岩，推测铜矿体形成后受到了

Table 1. Average contents, enrichment coefficient of trace elements and ratios of element pairs of the sandstone in the 5 and 9 Middle Member in the Bofang copper district**表 1.** 柏坊铜矿 5、9 中段砂岩微量元素平均含量、浓集系数及元素对比值

元素	辉铜矿矿石		浅色矿化砂岩		紫红色矿化砂岩		紫红色无矿砂岩	
	平均含量	浓集系数	平均含量	浓集系数	平均含量	浓集系数	平均含量	浓集系数
Cu	10,000.00	158.73	146.50	2.33	957.00	15.19	80.00	1.27
Ag	100.00	1250	2.90	36.25	0.90	11.25	0.50	6.25
As	28.50	12.95	28.50	12.95	5.00	2.27	13.50	6.14
Sb	32.50	54.17	5.00	8.33	6.00	10.00	5.00	8.33
Ti	100.00	0.02	2250.00	0.35	400.00	0.06	4250.00	0.66
V	22.50	0.16	25.50	0.18	9.00	0.06	88.50	0.63
Cr	1.50	0.01	34.50	0.31	4.00	0.04	65.00	0.59
Mn	197.00	0.15	31.50	0.02	85.00	0.07	205.50	0.16
Co	4.50	0.18	1.00	0.04	2.00	0.08	4.00	0.16
Ni	7.00	0.08	3.00	0.03	20.00	0.22	9.50	0.10
W	5.00	4.55	2.00	1.82	3.00	2.73	3.50	3.18
Sn	1.00	0.59	1.50	0.88	1.00	0.59	4.00	2.35
Mo	24.50	18.85	1.00	0.77	1.00	0.77	5.00	3.85
Sr	155.35	0.32	214.25	0.45	122.50	0.26	625.00	1.30
Ba	6.40	0.02	2157.10	5.53	26.60	0.07	385.50	0.99
Cd	75.65	378.25	0.50	2.50	0.80	4.00	0.50	2.50
Ga	0.10	0.01	6.65	0.37	1.80	0.10	16.00	0.89
Be	0.50	0.38	0.55	0.42	0.50	0.38	1.45	1.12
Rb	0.40	0.01	30.80	0.39	14.90	0.19	106.55	1.37
Cs	2.32	1.66	4.05	2.89	3.24	2.31	21.03	15.02
Nb	0.25	0.01	7.90	0.40	1.50	0.08	15.40	0.77
Ta	0.10	0.03	0.70	0.21	0.10	0.03	1.35	0.40
Zr	55.50	0.35	232.00	1.45	18.00	0.11	248.00	1.55
Hf	0.30	0.20	5.95	3.97	0.50	0.33	6.80	4.53
Sc	1.00	0.07	4.50	0.32	1.00	0.07	10.00	0.71
U	909.50	535.00	1.67	0.98	2.50	1.47	3.28	1.93
Th	0.12	0.02	6.03	1.04	1.43	0.25	14.81	2.55
Zr/Hf	185.00		38.99		36.00		36.47	
V/(V + Ni)	0.76		0.89		0.31		0.90	
V/Cr	15.00		0.74		2.25		1.36	
Ni/V	0.31		0.12		2.22		0.11	
Sr/Ba	24.27		0.10		4.61		1.62	

测试单位：中国广州澳实矿物实验室；注：浓集系数数据[18]元素地壳丰度计算；元素含量单位为 10^{-6} 。

地下热卤水的改造作用[13]。

3) 在氧化环境下岩石中 V/Cr 值很低[14] [15]。从辉铜矿矿石到紫红色矿化砂岩再到紫红色无矿砂岩中，V/Cr 值从 15.00→2.25→1.36 逐渐降低，表明辉铜矿矿石产生于还原环境中。相对于 Ni 来说，V 聚

集在强烈还原的富硫化氢环境中[16], 辉铜矿矿石中的 Ni/V 值较低, 为 0.31, 反映了较强的还原环境; 紫红色砂岩中 Ni/V 值最高, 达到了 2.22, 反映了氧化环境的特点, 同样反映出辉铜矿形成于还原环境中。

4) 根据辉铜矿矿石、浅色砂岩及紫红色砂岩微量元素蛛网图(图 3), 可知其中辉铜矿矿石、浅色矿化砂岩、紫红色矿化砂岩及紫红色无矿砂岩的 4 条曲线的变化规律大致相同, 砂岩与矿石均相对富集大离子亲石元素 Cs 及高场强元素 U; 相对亏损大离子亲石元素 Rb、Sr 及高场强元素 Nb、Th。其中辉铜矿矿石中的元素 Ti、Mo 在蛛网图中均呈凸起状态, 表现为相对富集, 而砂岩中的元素 Ti、Mo 则有凸起有凹陷; 砂岩中 Ba 元素有时凸起有时凹陷, 推测可能与矿区的重晶石化有关; 辉铜矿矿石中的 U 元素富集十分强烈, 平均品位 0.09%, 远超铀的最低工业品位 0.05% [17], 达到铀矿的标准, 反映铀矿为柏坊铜矿床中的伴生矿。矿石与砂岩在蛛网图中除少量元素以外, 其他元素均呈大致相同的变化趋势, 反映两者间存在亲缘性, 母岩来源具一致性, 表明砂岩参与到了辉铜矿矿石的成矿作用过程中并提供了部分的成矿物质。

5. 稀土元素地球化学

根据野外井下调查, 对矿区内的砂岩地层和辉铜矿矿石进行了采样以及稀土元素检测。砂岩与矿石的稀土元素分析及特征参数见表 2。

沉积时, 砂岩和其他沉积岩记录与该岩石沉积的起源和条件相关的地球化学信息[19]。通过分析数据可以看出, 砂岩中稀土元素总量(ΣREE)为 $19.82 \times 10^{-6} \sim 264.10 \times 10^{-6}$, 轻重稀土元素的比值 $[\omega(\text{LREE})/\omega(\text{HREE})]$ 介于 3.10~4.48 之间, 比值远大于 1, 表明轻稀土强烈较富集, 重稀土亏损较严重。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 3.57~4.25, 比值远大于 1, 轻稀土分馏程度较高; $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 值为 1.02~1.59, 重稀土分馏程度较低, 衰减速度比轻稀土慢。 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 、 $(\text{La}/\text{Lu})_N$ 、 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 值的变化范围分别为 6.69~11.29、6.61~11.10、5.05~8.65, 远大于 1, 曲线为右倾型, 同样表明 LREE 富集。铕异常(δEu)值在 0.44~0.64 之间, 平均为 0.61, δEu 值小于 1, Eu 呈负异常; 铈异常(δCe)值, 变化范围为 0.96~0.99, 数值变化较小且接近 1, 无异常。

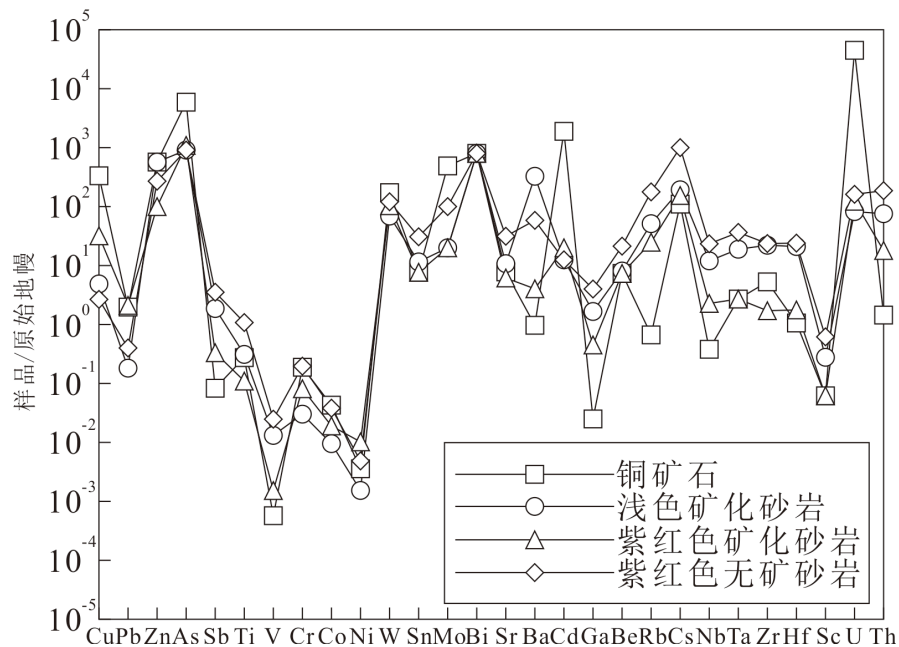


Figure 3. Trace elements spider graph of the sandstone in the 5 and 9 Middle Member in the Bofang copper district

图 3. 柏坊铜矿 5、9 中段砂岩微量元素蛛网图

Table 2. Average contents and characteristics coefficient of REE in the 5 and 9 Middle Member in the Bofang copper district
表 2. 柏坊铜矿 5、9 中段砂岩稀土元素平均含量及特征参数表

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣLREE	ΣHREE	ΣREE	$\omega(\text{LREE})/\omega(\text{HREE})$	δEu	δCe
辉铜矿 平均	0.65	1.60	0.22	1.00	0.32	0.09	0.44	0.08	0.46	0.10	0.26	0.04	0.23	0.04	3.60	3.87	5.23	9.10	0.77	0.70	1.00
浅色 矿化 砂岩 平均	17.10	34.00	3.75	14.80	2.88	0.47	2.24	0.34	2.21	0.47	1.41	0.23	1.52	0.24	13.10	73.00	21.75	94.75	3.42	0.54	0.96
紫红 色矿 化砂 岩平 均	3.70	7.40	0.76	2.90	0.57	0.11	0.51	0.08	0.48	0.10	0.27	0.04	0.26	0.04	2.60	15.44	4.38	19.82	3.53	0.61	0.99
紫红 色无 矿砂 岩平 均	41.05	81.75	8.61	33.40	6.18	1.15	4.56	0.69	4.35	0.93	2.69	0.43	2.66	0.42	24.75	172.13	41.46	213.58	4.09	0.63	0.98

测试单位：中国广州澳实矿物实验室。

辉铜矿矿石中稀土元素总量(ΣREE)为 $7.00 \times 10^{-6} \sim 11.19 \times 10^{-6}$ 。(La/Sm)_N 值为 1.05~1.48, 比值大于 1, 轻稀土分馏程度较高; (Gd/Lu)_N 值为 1.56~1.58, 重稀土分馏程度较高。(La/Yb)_N、(La/Lu)_N、(Ce/Yb)_N 值的变化范围分别为 1.78~2.08、1.73~2.08、1.77~1.89, 均大于 1, 曲线为右倾型, 同样表明 LREE 富集。铈异常(δEu)值在 0.67~0.72 之间, 平均为 0.69, δEu 值小于 1, Eu 呈负异常; 铈异常(δCe)值, 变化范围为 0.99~1.02, 平均为 1.00, 数值变化较小且接近 1, 无异常。

从辉铜矿矿石→紫红色矿化砂岩→紫红色无矿砂岩, ΣREE 随着 Cu 含量的减少而不断增加, 辉铜矿矿石中的 ΣREE 最低, 为 9.1, 而 δEu 最高。这表明辉铜矿中稀土元素有所亏损, 铜矿石在成矿过程中流失大部分稀土元素。而在水-岩作用过程中, 稀土元素尤其是 Eu 容易发生迁移[20], 这表明铜矿石是经流体改造发生水-岩反应而形成。

将区内砂岩与矿石进行稀土元素配分曲线图对比(图 4), 从图中可以看出, 砂岩与矿石的稀土配分曲线之间在形态上虽都具有右倾、Ce 无异常、Eu 呈弱负异常等特点但仍存在一定差异, 表明砂岩参与了辉铜矿矿体的成矿作用过程中并提供了部分的成矿物质。

6. 矿床成因

关于矿床成因, 前人认识各异, 有沉积、次生淋滤、卤水成矿、沉积再造、中~低温热液、古岩溶矿床等观点[2] [3] [5] [8] [13] [21]。柏坊铜矿床辉铜矿矿体共有两种赋存方式, 一种以沉积成矿方式赋存于白垩系砂岩及石炭系上统壶天群组灰岩中, 矿体呈层状、似层状; 一种受叠加改造后以充填成矿方式赋存于断裂破碎带中, 矿体呈脉状、网脉状及透镜状等。矿石与砂岩在蛛网图中除少量元素以外, 其他元素均呈大致相同的变化趋势, 反应两者间存在物源一致性, 白垩系砂岩在铜矿体成矿过程中提供了部分成矿物质, 同时矿区砂岩层富亲硫元素, 贫亲石、亲铁元素, 反映白垩系砂岩具有“矿源层”特征。宛克勇对柏坊铜矿床的脉石矿物进行 H、O 同位素分析, 得到方解石的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{smow}}$ 值为 11.8‰~19.7‰; δD 值为 -67.3‰~-131.6‰, 显示成矿热液具有多来源性[1]。辉铜矿矿石中 Zr/Hf 值达到 185.00, 远超砂岩内

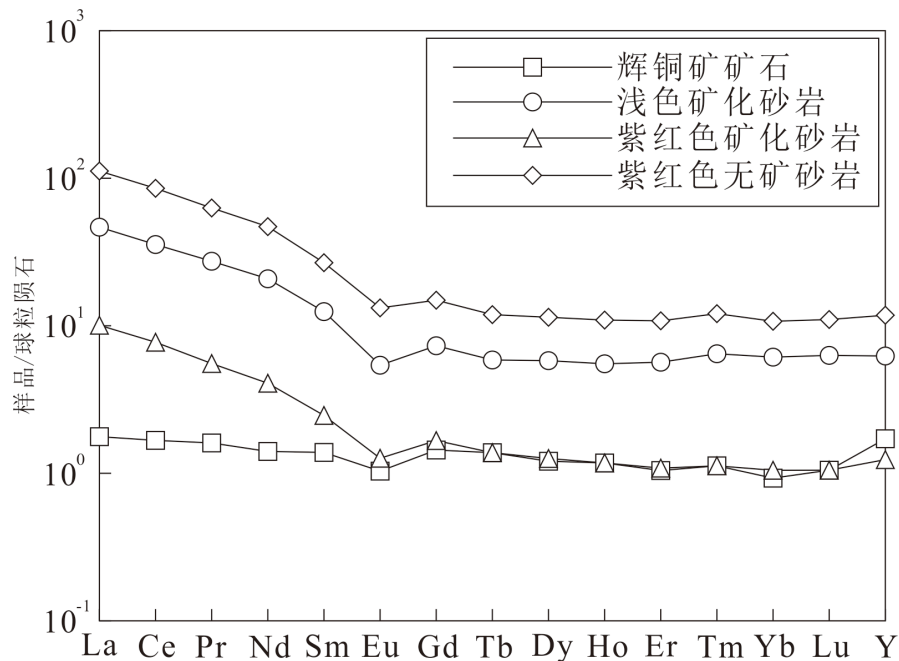


Figure 4. REE distribution patterns of the sandstone in the 5 and 9 Middle Member of the Bofang copper district

图 4. 柏坊铜矿区 5、9 中段砂岩稀土元素配分曲线图

的 Zr/Hf 值, 表明辉铜矿矿石经热液改造作用形成; 辉铜矿矿石中的 Sr/Ba 值为 24.27, 远大于 1, 反映矿体曾经历地下热卤水的改造作用。区内白垩系砂岩作为矿源层, 提供主要的成矿物质, 而且砂岩的高渗透率及砂岩内矿化元素的富集均能促使大规模的成矿流体的运移, 有利于成矿作用的发生; 区内褶皱与断层严格控制着矿体的产出部位, 其中 F_{22} 更是矿区的容矿构造。矿床地质特征及岩石地球化学特征显示柏坊铜矿床成矿作用经历了沉积成岩成矿并叠加有后期地下热卤水改造过程。综上所述, 柏坊铜矿床为沉积-改造型铜矿床, 即先经历沉积作用形成层状、似层状矿体, 再经地下热卤水叠加改造作用, 沿构造破碎带充填为脉状、网脉状矿体。

7. 结论

- 1) 柏坊铜矿床成矿与区内白垩系地层及 F_{22} 断裂构造关系密切;
- 2) 矿床地球化学特征研究表明砂岩参与到了辉铜矿矿石的成矿作用过程中并提供了部分的成矿物质, 铜矿体形成后还受到了地下热卤水的改造作用;
- 3) 柏坊铜矿床属于沉积-改造型铜矿床。

致 谢

野外期间得到了湖南省地质科学研究所李剑所长、宋泽友师兄的大力支持和帮助, 刘忠法、冯雨周、谭华杰等对论文的撰写提供了帮助, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] 宛克勇. 湖南柏坊铜矿床稳定同位素地球化学初步研究[J]. 矿产与地质, 2008, 22(6): 541-542.
- [2] 柳智, 黄满湘, 马德成, 王银茹. 湖南衡阳柏坊铜矿矿体地质特征及矿床成因探讨[J]. 南方金属, 2011(5): 16-18+25.

- [3] 彭海泉. 柏坊铜石塘铜矿床控矿构造特征及其找矿方向[J]. 矿山地质, 1991, 12(2): 81-86.
- [4] 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. 地质学报, 2011, 85(5): 636-658.
- [5] 公凡影, 李永胜, 甄世民, 齐钊宇, 巩小栋. 湖南柏坊铜矿矿床地质特征及矿床成因初探[J]. 矿物学报, 2013(S2): 152-153.
- [6] 冯雨周, 邵拥军, 葛超, 蒋梦同, 宋泽友. 湖南衡阳柏坊铜矿床地质特征及成因分析[J]. 南方金属, 2017(2): 29-31.
- [7] 中南工业大学, 水口山矿务局. 柏坊铜矿区及外围找矿预测研究[M]. 衡阳: 水口山矿务局, 1992: 12-102.
- [8] 杨国高, 李启津. 湖南柏坊铜矿伴生银的赋存特征[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1992(4): 351-355.
- [9] 李静, 吴静, 韩润生, 吴鹏. 云南大姚地区上白垩统马头山组六苴段中亚段含铜砂岩微量元素和稀土元素地球化学[J]. 地质通报, 2010, 29(6): 945-952.
- [10] 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [11] 梁祥济. 水-岩相互作用和成矿物质来源[M]. 北京: 学苑出版社, 1995.
- [12] 陈建强, 周洪瑞, 王训练. 沉积学及古地理学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- [13] 邓湘伟, 戴雪灵, 黄满湘. 柏坊铜矿成矿规律及成矿模式探讨[J]. 华南地质与矿产, 2008(4): 22-25.
- [14] Dill, H. (1986) Metallogeneses of Early Paleozoic Graptolite Shales from the Graefenthal Horst (Northern Bavaria-Federal Republic of Germany). *Economic Geology*, **81**, 889-903. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.81.4.889>
- [15] Krejci-Graf, K. (1964) Geochemical Diagnosis of Facies. *Proceedings of the Yorkshire Geological and Polytechnic Society. Geological Society of London*, **34**, 469-521.
- [16] Lewan, M.D. (1984) Factors Controlling the Proportionality of Vanadium to Nickel in Crude Oils. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, **48**, 2231-2238. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90219-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90219-9)
- [17] 刘恩充, 刘叙古. 试谈合理确定铀矿开采品位指标[J]. 铀矿冶, 1982(3): 61-66.
- [18] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976(3): 167-174.
- [19] Sawlowicz, Z. (2013) REE and Their Relevance to the Development of the Kupferschiefer Copper Deposit in Poland. *Ore Geology Reviews*, **55**, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.06.006>
- [20] McLennan, W.H. (1988) REE Mobility at Constant in interbREE Ratio in the Alteration Zone at the Phelps Dodge Missive Sulfide Deposits, Matagami, Quebec. *Mineral. Deposita*, **23**, 231-238.
- [21] 马德成, 黄满湘, 柳智, 王银茹, 魏铮. 湖南柏坊铜矿岩溶特征及其与成矿的关系[J]. 资源环境与工程, 2011, 25(2): 91-94.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ag@hanspub.org