

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2019.03.013

西藏多不杂铜矿床黄铁矿成分标型特征及地质意义

何阳阳¹, 温春齐², 刘显凡²

(1. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川 内江 641112;

2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059)

摘要: 多不杂铜矿床是近年来在西藏多龙矿集区发现的超大型斑岩铜矿, 铜矿石中金的含量较高, 黄铁矿是重要的载金矿物之一。研究黄铁矿形态特征、热电性特征、化学成分标型特征等与金矿化具有显著相关性, 对于矿石成因类型、成矿物质和流体来源、矿床成因的认识具有重要意义。通过对多不杂铜矿床中黄铁矿的化学成分标型特征研究表明, 随着成矿的进行, $N(S)/N(Fe)$ 、 δFe 、 δS 值逐步变小; $w(Co)/w(Ni)$ 值逐步增加, $w(Co)$ 值和 $w(Ni)$ 值逐步减小; $w(Se)$ 值逐步增加, $w(S)/w(Se)$ 值逐步减小; $w(As)$ 值、 $w(Ag)$ 值以及 $w(Au)$ 值逐步减小; Cu 、 Au 、 Ag 呈正相关关系; 黄铁矿具有轻稀土相对富集, 重稀土相对亏损的特征, 这是岩浆热液成因的标志; 从岩浆期到热液期, 黄铁矿稀土元素表现为正铈异常向负铈异常演化的特征, 这是由岩浆向热液演化的依据。

关键词: 多不杂铜矿床; 黄铁矿; 成分标型特征; 西藏

中图分类号: P578.292 **文献标识码:** A

0 引言

多不杂铜矿床位于西藏阿里地区改则县物玛乡, 是多龙矿集区内发现的第一个超大型铜矿床。矿体产于花岗闪长斑岩体上部的钾化带、石英绢云岩化带及岩体边部的青磐岩化变长石石英砂岩中(图1); 斑岩岩体中铜矿化以浸染状、细脉状黄铜矿化为主; 岩体与围岩的内外接触带部位, 以脉状、网脉状黄铜矿化为主, 铜品位明显增高; 外侧青磐岩化变长石石英砂岩中以脉状、细脉状、浸染状黄铜矿化为主, 铜品位逐渐降低^[2]。矿床平均品位 $w(Cu) = 0.51\%$, $w(Au) = 0.2 \times 10^{-6}$ ^[3] (金的平均含量大于 0.1×10^{-6} , 是典型的伴生金矿床^[4])。

金在元素周期表中属 IB 族, 与铜、银同族(铜族元素), 故在铜矿床中往往会伴生金, 铜、金是最普遍

分布的元素组合^[5]。何阳阳^[6]通过对多不杂铜矿床 23 号勘探线剖面的统计分析, 认为金在该矿床中分布极不均匀, 金品位较低, 金在矿石中分布向一侧倾斜(高品位方向), 总体呈单斜式分布; 斑岩型矿石金品位较砂岩型矿石高; 从钾化带→石英绢云岩化带→青磐岩化带, Au 的品位在逐渐降低。

黄铁矿是最主要的载金矿物之一, 其形态特征、热电性特征、化学成分特征等与金矿化具有显著相关性^[7-8], 尤其是化学成分标型特征所含信息量最为丰富, 对于岩矿石及矿床成因的认识具有重要意义^[9-10]。本文深入分析多不杂铜矿床中黄铁矿的化学成分标型特征, 通过对主微量元素和稀土元素的研究揭示其成因类型。

1 测试方法及结果

测试工作在西南冶金地质测试中心完成。首先

收稿日期: 2018-07-23; 责任编辑: 王传泰

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(编号:201011013)、四川矿产资源研究中心资助项目(编号:SCKCZY2016-ZC03)、四川省教育厅科研项目(编号:17ZB0223)联合资助。

作者简介: 何阳阳(1984—), 男, 副教授, 博士, 从事地质找矿工作。通信地址: 四川省内江市东桐路 705 号, 内江师范学院地理与资源科学学院; 邮政编码: 641112; E-mail: yangyang.he@qq.com

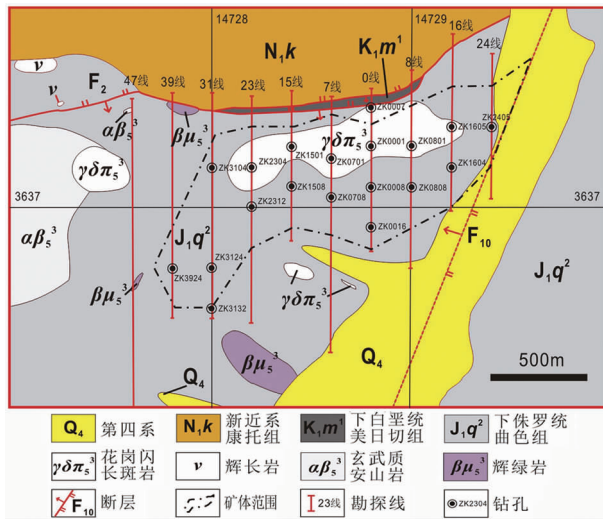


图 1 多不杂铜矿床矿体平面图
(据文献[1]修改)

Fig. 1 Plan of ore bodies of Duobuza copper deposit

在室内将相关岩石样品洗干净并晾干,选择新鲜部位,将其粉碎至 60 目—80 目,采用人工重砂法将黄铁矿分离出来,然后通过双目实体显微镜手工挑选单矿物,其纯度达到 99%。用纯净水将选出的黄铁矿超声清洗,去除表面上的杂质,40℃下烘干。称取 50 mg 左右放入加有 HNO₃ 和 HCl 各 1 ml 的 Teflon 溶样罐中,将溶样罐放在电热板上,升温至 120℃溶解 2 天左右。待黄铁矿完全溶解后将溶液蒸干,然后加入 HF 和 HNO₃ 各 1 ml 溶解 2 天左右,再将溶液蒸干。反复蒸干后用浓度为 30% 的 HNO₃ 提取,并加入 Rh 作为内标使溶液标定在 50 ml,最后在等离子质谱仪(ICP-MS)上分析其化学成分。测试结果见表 1 和表 2。

2 黄铁矿成分标型特征

2.1 主量元素特征

理论上,黄铁矿中 Fe 所占比例为 46.55%,S 所占比例为 53.45%,原子比 $N(S)/N(Fe)$ 等于 2。实际上,不同金属矿床黄铁矿中的 $N(Fe)$ 和 $N(S)$ 所占比例与理论值存在偏差,使得 $N(S)/N(Fe)$ 值通常不等于 2;其中, $N(S)/N(Fe)$ 值 >2 时称其为铁亏损, $N(S)/N(Fe) < 2$ 时称其为硫亏损^[12]。而 δFe 和 δS 这两个参数可以用来表征黄铁矿中 Fe 和 S 偏离理论值的程度^[13],其计算公式为:

$$\delta Fe = (100x - 46.55) \times 100 / 46.55 \quad (1)$$

$$\delta S = (100y - 53.45) \times 100 / 53.45 \quad (2)$$

式中, x 为黄铁矿中 Fe 的质量分数, y 为黄铁矿中 S 的质量分数。

根据公式(1)和(2),计算出多不杂矿区岩浆期、热液期黄铁矿样品主量元素的相关参数如下:样品 DBZ004, $N(S)/N(Fe) = 1.999$, $\delta Fe = -0.129$, $\delta S = -0.599$;样品 DBZ029, $N(S)/N(Fe) = 2.001$, $\delta Fe = -1.697$, $\delta S = -2.152$;样品 DBZ059, $N(S)/N(Fe) = 2$, $\delta Fe = -1.504$, $\delta S = -1.964$;样品 DBZ019-1, $N(S)/N(Fe) = 1.999$, $\delta Fe = -0.730$, $\delta S = -1.197$;样品 DBZ019-2, $N(S)/N(Fe) = 2.001$, $\delta Fe = -11.493$, $\delta S = -11.899$;样品 DBZ025, $N(S)/N(Fe) = 2.001$, $\delta Fe = -3.093$, $\delta S = -3.536$;样品 DBZ027, $N(S)/N(Fe) = 2.001$, $\delta Fe = -3.222$, $\delta S = -3.667$;样品 DBZ030, $N(S)/N(Fe) = 1.999$, $\delta Fe = -0.580$, $\delta S = -1.048$ 。岩浆期黄铁矿平均值, $N(S)/N(Fe) = 2.001$, $\delta Fe = -1.117$, $\delta S = -1.572$;热液期黄铁矿平均值, $N(S)/N(Fe) = 2.000$, $\delta Fe = -3.824$, $\delta S = -4.269$ 。由岩浆期→热液期, $N(S)/N(Fe)$ 、 δFe 、 δS 值逐步变小。

表 1 黄铁矿主微量元素测定结果

Table 1 Analysis of trace elements in pyrite of Duobuza copper deposit

样号	成矿阶段	Fe	S	Co	Ni	Au	Ag	As	Sb	Se	Te	Cu	Pb	Zn	Mo	Ti	Tl
DBZ004	岩浆期	46.49	53.13	35.2	24.4	0.62	20.1	6860	12.5	0.40	0.42	788	507	53.7	5.22	650	0.22
DBZ029		45.76	52.30	448	104	0.18	11.9	77.6	0.79	2.34	1.94	3210	916	73.7	46.6	30	0.048
DBZ059		45.85	52.40	155	138	0.1	5.45	4.13	0.40	1.98	2.41	22000	30.0	65.1	4.32	2430	0.042
均值		46.03	52.61	212.7	88.8	0.3	12.5	2313.9	4.56	1.57	1.59	8666	484.3	64.2	18.7	1036.7	0.1
DBZ019-1	热液期	46.21	52.81	215	36.0	0.1	2.40	13.4	0.80	1.66	0.14	22.7	52.6	23.2	0.38	40	0.072
DBZ019-2		41.20	47.09	154	28.8	0.14	20.6	15.0	6.70	1.46	0.36	65.1	302	56.5	0.34	70	0.44
DBZ025		45.11	51.56	127	94.4	0.1	11.4	6.52	0.86	1.98	1.27	2400	2910	740	108	620	0.042
DBZ027		45.05	51.49	95.6	46.4	0.14	8.74	66.5	1.37	1.98	0.73	3480	327	166	17.8	40	0.073
DBZ030		46.28	52.89	34.7	40.6	0.1	2.68	3.22	0.57	2.37	0.24	8510	34.2	35.0	10.1	90	0.034
均值		44.77	51.16	181.25	49.24	0.11	9.16	20.93	2.06	1.89	0.55	2895.6	725.2	204.1	27.3	172	0.132

量单位: $w(Fe, S)/\%$, $w(其它)/10^{-6}$

表 2 黄铁矿稀土元素测定结果

Table 2 Analysis of REE in pyrite of Duobuza copper deposit

成矿阶段	岩浆期				热液期			
样号	DBZ004	DBZ029	DBZ059	DBZ019-1	DBZ019-2	DBZ025	DBZ027	DBZ030
La	1.98	1.07	7.78	0.54	28.4	1.5	11.8	23.2
Ce	3.76	1.8	10.9	1.59	46.4	2.64	20.6	34.2
Pr	0.5	0.2	1	0.15	5.44	0.3	2.32	3.24
Nd	1.86	0.7	3.14	0.54	19.2	1	7.58	9.67
Sm	0.45	0.14	0.48	0.09	2.94	0.19	1.32	1.54
Eu	0.18	0.05	0.18	0.03	0.62	0.05	0.32	0.38
Gd	0.44	0.14	0.42	0.09	2.5	0.17	1.19	1.45
Tb	0.08	0.03	0.07	0.02	0.35	0.03	0.22	0.26
Dy	0.42	0.2	0.42	0.09	1.78	0.14	1.36	1.55
Ho	0.08	0.04	0.09	0.02	0.33	0.03	0.26	0.33
Er	0.24	0.11	0.28	0.05	0.82	0.08	0.82	0.96
Tm	0.04	0.02	0.05	0.01	0.11	0.01	0.13	0.16
Yb	0.26	0.14	0.36	0.05	0.66	0.08	0.87	1
Lu	0.05	0.02	0.06	0.01	0.1	0.01	0.14	0.16
$w(\Sigma\text{REE})$	10.33	4.67	25.23	3.27	109.65	6.23	48.93	78.1
$w(\text{LREE})$	8.73	3.96	23.48	2.94	103	5.68	43.94	72.23
$w(\text{HREE})$	1.6	0.71	1.75	0.33	6.65	0.55	4.99	5.87
$w(\text{LR})/w(\text{HR})$	5.44	5.55	13.4	8.9	15.49	10.4	8.81	12.3
$w(\text{La})/w(\text{Yb})$	7.62	7.64	21.61	11.74	43.03	19.74	13.56	23.2
$w(\text{Sm})/w(\text{Nd})$	0.24	0.2	0.15	0.17	0.15	0.19	0.17	0.16
$w(\text{Eu})/w(\text{Sm})$	0.4	0.34	0.38	0.29	0.21	0.27	0.24	0.25
$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$	2.77	4.81	10.2	3.77	6.08	4.97	5.62	9.48
$w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$	1.37	0.81	0.94	1.53	3.06	1.81	1.1	1.17
δCe	0.89	0.88	0.81	1.32	0.84	0.9	0.89	0.83
δEu	1.22	1.04	1.2	0.89	0.68	0.85	0.77	0.77

注:量单位 $w_{\text{B}}/10^{-6}$ 。球粒陨石标准值据文献[11]; $w(\text{LR})=w(\text{LREE})$, $w(\text{HR})=w(\text{HREE})$ 。

2.2 微量元素特征

(1) $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值特征

元素 Co、Ni、Fe 化学性质类似,黄铁矿中的 Fe 常为 Co、Ni 代替。黄铁矿中 $w(\text{Co})$ 、 $w(\text{Ni})$ 、 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值在不同成因类型的矿床中具有不同的特征,尤其是 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值应用最广,可用来探讨黄铁矿成因^[14-15]。Bajwah 等^[16]认为沉积成因黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值 <1 ,平均值为 0.63,且 $w(\text{Co})$ 值和 $w(\text{Ni})$ 值含量较低;热液型黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值通常介于 1.17~5 之间, $w(\text{Co})$ 值和 $w(\text{Ni})$ 值变化较大;火山喷气块状硫化物型矿床 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值介于 5~50 之间,具有高 $w(\text{Co})$ 值 (480×10^{-6})、低 $w(\text{Ni})$ 值 (小于 100×10^{-6}) 特征;岩浆热液型黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值介于 1~5 之间。

由表 1 可知,多不杂铜矿区的黄铁矿中的 $w(\text{Co})$ 值在 $34.7 \times 10^{-6} \sim 448 \times 10^{-6}$ 之间变化, $w(\text{Ni})$ 值在 $24.4 \times 10^{-6} \sim 138 \times 10^{-6}$ 之间变化, $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值变化范围为 0.9~6.0 (平均值 2.8)。岩浆期黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 平均值为

2.27, $w(\text{Co})$ 平均值为 212.7×10^{-6} , $w(\text{Ni})$ 平均值为 88.8×10^{-6} ;热液期黄铁矿 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 平均值为 3.12, $w(\text{Co})$ 平均值为 125.3×10^{-6} , $w(\text{Ni})$ 平均值为 49.2×10^{-6} 。由岩浆期→热液期, $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值逐渐增加, $w(\text{Co})$ 值逐渐减小, $w(\text{Ni})$ 值逐渐减小。

(2) $w(\text{Se})$ 、 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值特征

黄铁矿中的 $w(\text{Se})$ 、 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值也具有重要标型意义^[17]。岩浆热液型黄铁矿 $w(\text{Se})$ 值较低,通常介于 $0.5 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 之间; $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值变化范围为 $25 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4$ 。

由表 1 不难看出,多不杂铜矿区黄铁矿中的 $w(\text{Se})$ 值在 $0.40 \times 10^{-6} \sim 2.37 \times 10^{-6}$ 之间变化,平均值为 1.8×10^{-6} ; $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 比值变化范围为 $22.3 \times 10^4 \sim 132.8 \times 10^4$,平均值为 40×10^4 。岩浆期黄铁矿 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 平均值为 60.5×10^4 , $w(\text{Se})$ 平均值为 1.57×10^{-6} ;热液期黄铁矿 $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 平均值为 27.7×10^4 , $w(\text{Se})$ 平均值为 1.89×10^{-6} 。由岩浆期→热液期, $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值逐渐减小, $w(\text{Se})$ 值逐渐增加。

(3) $w(\text{As})$ 、 $w(\text{Ag})$ 、 $w(\text{Au})$ 值特征

As 元素能以类质同象的形式进入黄铁矿晶格代替 S 元素, $w(\text{As})$ 在不同成因类型的矿床中含量不同; 同样, 黄铁矿中亲硫元素 Au 和 Ag 在不同成因类型的矿床中含量也不一样; 它们都具有标型意义^[18]。

多不杂铜矿区黄铁矿 $w(\text{As})$ 值在 $3.22 \times 10^{-6} \sim 6860 \times 10^{-6}$ 之间变化(见表1), 平均值为 880.8×10^{-6} ; $w(\text{Ag})$ 值在 $2.40 \times 10^{-6} \sim 20.6 \times 10^{-6}$ 之间变化, 平均值为 10.4×10^{-6} ; $w(\text{Au})$ 值在 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.62 \times 10^{-6}$ 之间变化, 平均值为 0.18×10^{-6} 。岩浆期黄铁矿 $w(\text{As})$ 平均值为 2313.9×10^{-6} , $w(\text{Ag})$ 平均值为 12.5×10^{-6} , $w(\text{Au})$ 平均值为 0.3×10^{-6} ; 热液期黄铁矿 $w(\text{As})$ 平均值为 20.9×10^{-6} , $w(\text{Ag})$ 平均值为 9.2×10^{-6} , $w(\text{Au})$ 平均值为 0.1×10^{-6} 。由岩浆期→热液期, $w(\text{As})$ 值逐渐减小, $w(\text{Ag})$ 值逐渐减小, $w(\text{Au})$ 值逐步减小。

(4) $w(\text{Cu})$ 、 $w(\text{Pb})$ 、 $w(\text{Zn})$ 值及 $\lg a$ — $\lg b$ 图解、综合比值 Φ 特征

亲铜元素 Cu、Pb 和 Zn 多以机械混入的方式存在于黄铁矿中, 常见黄铜矿、方铅矿和闪锌矿充填在破碎的黄铁矿脉中, 黄铁矿中的 $w(\text{Cu})$ 值、 $w(\text{Pb})$ 值、 $w(\text{Zn})$ 值在空间上具有标型意义^[19], 可通过 $\lg a$ — $\lg b$ 图解来表示^[20], 其 a 、 b 计算公式: $a = w(\text{Se})/w(\text{As}) \times 10^4$, $b = [w(\text{Fe})/w(\text{Pb} + \text{Zn})]/[w(\text{S})/w(\text{Se})] \times 10^4$ 。

黄铁矿中低温元素组合和高温元素组合的综合比值 Φ 越大, 表明矿体边部或上部相对低温^[20]。 Φ 值计算公式: $\Phi = [w(\text{As}) \times w(\text{Ag})]/[w(\text{Cu}) \times w(\text{Co} + \text{Ni})]$, 分子代表低温元素, 分母代表高温元素。

多不杂铜矿区的黄铁矿 $w(\text{Cu})$ 值在 $22.7 \times 10^{-6} \sim 22000 \times 10^{-6}$ 之间变化, 平均值为 5059.5×10^{-6} ; $w(\text{Pb})$ 值在 $30 \times 10^{-6} \sim 2910 \times 10^{-6}$ 之间变化, 平均值为 634.9×10^{-6} ; $w(\text{Zn})$ 值在 $23.2 \times 10^{-6} \sim 740 \times 10^{-6}$ 之间变化, 平均值为 151.7×10^{-6} 。岩浆期黄铁矿的 $w(\text{Cu})$ 平均值为 8666×10^{-6} , $w(\text{Pb})$ 平均值为 484.3×10^{-6} , $w(\text{Zn})$ 平均值为 64.2×10^{-6} ; 热液期黄铁矿的 $w(\text{Cu})$ 平均值为 2895.6×10^{-6} , $w(\text{Pb})$ 平均值为 725.2×10^{-6} , $w(\text{Zn})$ 平均值为 204.1×10^{-6} 。岩浆期黄铁矿 $\lg a$ 平均值为 1.975, $\lg b$ 平均值为 1.457, Φ 平均值为 0.979; 热液期黄铁矿 $\lg a$ 平均值为 3.181, $\lg b$ 平均值为 1.707, Φ 平均值为 0.007。由岩浆期→热液期, $\lg a$ 、 $\lg b$ 值逐渐增加, 且呈正相关(图2); Φ 值则逐渐降低。

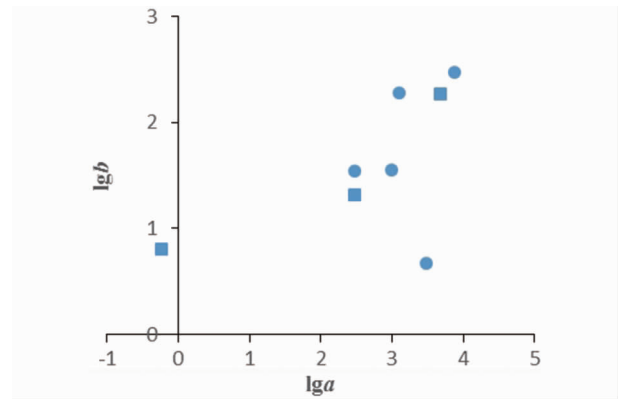


图2 $\lg a$ — $\lg b$ 图解

Fig. 2 $\lg a$ — $\lg b$ diagram

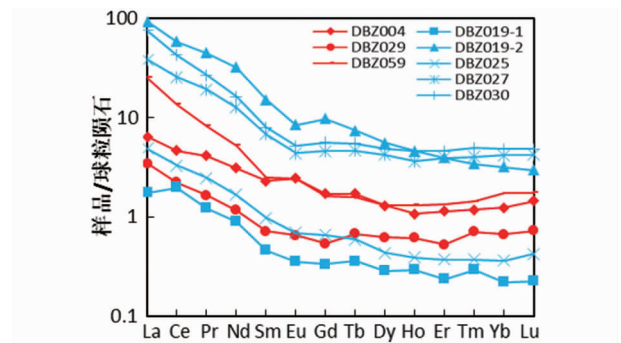


图3 黄铁矿稀土球粒陨石标准化配分图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE pattern of pyrite

2.3 稀土元素特征

由表2可知, 多不杂铜矿区黄铁矿的 $w(\Sigma\text{REE})$ 值为 $3.27 \times 10^{-6} \sim 109.65 \times 10^{-6}$, $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为 5.44~15.49, $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 值为 7.62~43.03, δEu 值为 0.68~1.22, δCe 值为 0.81~1.32。岩浆期 $w(\Sigma\text{REE})$ 平均值为 13.41×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 平均值为 8.13, $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 平均值为 12.29, δEu 平均值为 1.15, δCe 平均值为 0.86; 热液期 $w(\Sigma\text{REE})$ 平均值为 49.24×10^{-6} , $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 平均值为 11.18, $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 平均值为 22.25, δEu 平均值为 0.79, δCe 平均值为 0.96。由岩浆期→热液期, $w(\Sigma\text{REE})$ 、 $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 、 $w(\text{La})/w(\text{Yb})$ 值逐步增加, δEu 逐渐减小, δCe 逐渐增加。

$w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为轻稀土元素内部比值, $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为重稀土元素内部比值^[21]。多不杂铜矿区黄铁矿 $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值(2.77~10.2)、 $w(\text{Gd})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值(0.81~3.06)总体上大于1, 这些特征表明轻稀土元素分馏程度和富集程度相较而言要高一些。

从图 3 中可知,黄铁矿各成矿阶段的稀土球粒陨石标准化配分曲线虽不一致,却呈现出有规律的变化趋势,都呈右倾型配分模式,表明轻稀土元素相对重稀土元素而言富集;岩浆期黄铁矿 δEu 值为正异常,热液期黄铁矿 δEu 值为负异常; δCe 值则逐渐由负异常过渡为正异常。

3 讨论

岩浆期黄铁矿平均值 $N(\text{S})/N(\text{Fe}) = 2.001$, $\delta\text{Fe} = -1.117$, $\delta\text{S} = -1.572$;热液期平均值 $N(\text{S})/N(\text{Fe}) = 2.000$, $\delta\text{Fe} = -3.824$, $\delta\text{S} = -4.269$,略微亏铁亏硫。随着成矿过程的进行,Se、As 进入黄铁矿晶格逐渐替代 S,而 Co、Ni 则逐渐替代 Fe,这样就导致了上述参数值逐渐降低及 Fe、S 偏离理论值的程度越来越大的特点。另外,这些数据与严育通等^[22]统计的岩浆热液型金属矿床参数值吻合,指示多不杂铜矿床为岩浆热液型矿床。多不杂矿区黄铁矿的 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值整体介于 1~5 之间,显示其属于岩浆热液成因; $w(\text{Co})-w(\text{Ni})-w(\text{As})$ 图解(图 4)、 $w(\text{Co})-w(\text{Ni})$ 图解(图 5)显示出样品投影点大部分落入岩浆或火山热液型区域,与 $N(\text{S})/N(\text{Fe})$ 、 δFe 、 δS 参数值判别相一致。

多不杂铜矿区黄铁矿 $\lg a-\lg b$ 图解显示其呈正相关,即 Cu 和亲硫元素 Au 呈正相关,这与何阳阳^[6]对多不杂矿区 Cu、Au 相关性分析一致。Au、Ag、Cu、Pb、Zn 等元素以机械混入物存在于黄铁矿中,随着成矿的进行,黄铁矿中的 Cu、Au、Ag 在逐渐降低。综合比值 Φ 越大表明矿体上部相对低温;随着成矿的进行,岩浆热液型矿床的流体温度将逐渐降低。这些特征符合岩浆热液型金属矿床的成矿规律。

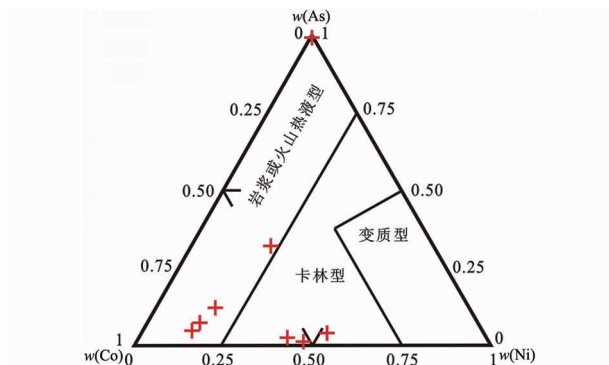


图 4 $w(\text{Co})-w(\text{Ni})-w(\text{As})$ 图解

(底图据文献[13])

Fig. 4 $w(\text{Co})-w(\text{Ni})-w(\text{As})$ diagram

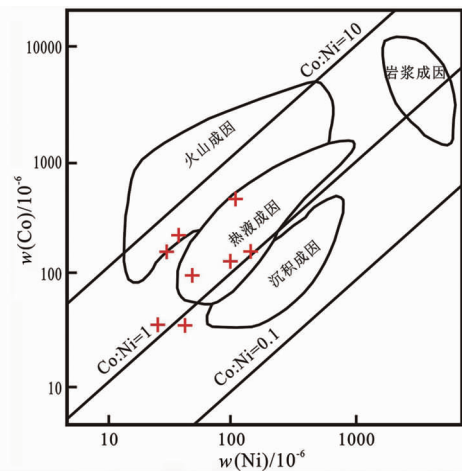


图 5 $w(\text{Co})-w(\text{Ni})$ 图解

(底图据文献[13])

Fig. 5 $w(\text{Co})-w(\text{Ni})$ diagram

多不杂铜矿区黄铁矿的稀土元素分布曲线均呈现出右倾型配分模式,具有轻稀土富集的特征,这是岩浆热液型矿床的标志^[23]。由岩浆期→热液期,黄铁矿稀土元素表现为正铕异常向负铕异常演化的特征,这是由岩浆向热液演化的依据。

综上,黄铁矿所反映出的这些特征指示多不杂铜矿床符合岩浆热液型金属矿床特征。

4 结论

(1)随着成矿的进行,多不杂矿区黄铁矿的主微量元素标型特征表现为 $N(\text{S})/N(\text{Fe})$ 、 δFe 、 δS 参数值逐渐变小; $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 值逐渐增加, $w(\text{Co})$ 值和 $w(\text{Ni})$ 值逐渐减小; $w(\text{Se})$ 值逐渐增加, $w(\text{S})/w(\text{Se})$ 值逐渐减小; $w(\text{As})$ 值、 $w(\text{Ag})$ 值以及 $w(\text{Au})$ 值逐渐减小;Cu、Au、Ag 呈正相关关系。这与岩浆热液型矿床黄铁矿的主微量元素标型特征一致。

(2)黄铁矿具有轻稀土相对富集,重稀土相对亏损的特征,这是岩浆热液型矿床的标志;从岩浆期到热液期,黄铁矿稀土元素表现为正铕异常向负铕异常演化的特征,这是由岩浆向热液演化的依据。这一地质事件促进了壳幔之间发生物质和能量的转换,这也是多不杂矿区成矿物质和流体具有壳幔混染的原因。

参考文献:

- [1] 何阳阳,温春齐,刘显凡. 西藏多不杂铜矿床硫铅同位素地球化学示踪[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(5): 855-862.
- [2] 何阳阳,温春齐,刘显凡,等. 西藏多不杂铜矿区曲色组砂岩

- 化学组分特征及构造背景[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 113-118.
- [3] 陈红旗, 张天平, 李玉昌, 等. 西藏班公湖-怒江成矿带西段铜多金属资源调查报告[R]. 拉萨: 西藏自治区地质调查院, 2011.
- [4] 夏国俊. 矿产资源储量评审认定与储量计算及工业指标应用手册[M]. 长春: 银声音像出版社, 2010.
- [5] 丁俊华, 许文渊, 吴厚泽. 中国伴生金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [6] 何阳阳. 西藏班公湖-怒江成矿带西段多不杂铜矿床成因研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- [7] 陈光远, 邵伟, 孙岱生. 胶东金矿成因矿物学与找矿[M]. 重庆: 重庆出版社, 1989.
- [8] 宫哈凝. 金矿床中黄铁矿的成因与找矿标志[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [9] 张锦让, 侯林, 邹志超, 等. 泥堡金矿床载金含砷黄铁矿的微量元素 LA-ICP-MS 原位测定及其对矿床成因的指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(3): 493-505.
- [10] 冷成彪. 滇西北红山铜多金属矿床的成因类型: 黄铁矿和磁黄铁矿 LA-ICPMS 微量元素制约[J]. 地学前缘, 2017, 24(6): 162-175.
- [11] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [M] // Henderson P. Rare-Earth Element Geochemistry. Amsterdam, Elsevier, 1984: 63-114.
- [12] 郑卫杰. 不同类型金矿黄铁矿微量元素和热电性标型特征[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [13] 严育通, 张娜, 李胜荣, 等. 胶东各类型金矿床黄铁矿化学成分标型特征[J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 88-93.
- [14] 徐国风, 邵洁莲. 黄铁矿的标型特征及其实际意义[J]. 地质论评, 1980, 20(6): 541-546.
- [15] 张文媛, 王翠芝, 魏晓灿, 等. 紫金山金铜矿黄铁矿化学成分标型特征及其意义[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 974-984.
- [16] Bajwah Z U, Seccombe P K, Offler R. Trace element distribution, Co: Ni ratios and genesis of the Big Cadia iron-copper deposit, New South Wales, Australia [J]. Mineral Deposita, 1987, 22: 292-300.
- [17] 裴玉华, 严海麒. 河南省嵩县前河金矿床黄铁矿的标型特征及其意义[J]. 地质与勘探, 2006, 42(3): 56-60.
- [18] 宫丽, 马光. 黄铁矿的成分标型特征及其在金属矿床中的指示意义[J]. 地质找矿论丛, 2011, 26(2): 162-166.
- [19] 彭丽娜, 魏俊浩, 孙晓雁, 等. 浙东南怀溪铜金矿床黄铁矿标型特征及其地质意义[J]. 地质与勘探, 2009, 45(5): 577-587.
- [20] 胡楚雁. 黄铁矿的微量元素及热电性和晶体形态分析[J]. 现代地质, 2001, 15(2): 238-241.
- [21] 温春齐, 多吉. 矿床研究方法[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2009.
- [22] 严育通, 李胜荣, 贾宝剑, 等. 中国不同成因类型金矿床的黄铁矿成分标型特征及统计分析[J]. 地学前缘, 2012, 19(4): 214-226.
- [23] 何阳阳, 温春齐, 刘显凡. 西藏多不杂铜矿床稀土元素地球化学特征研究[J]. 中国稀土学报, 2018, 36(1): 122-128.

Typomorphic characteristics of the pyrite composition in the Duobuza copper deposit, Tibet and the geological significance

HE Yangyang¹, WEN Chunqi², LIU Xianfan²

(1. College of Geography & Resource Science, Neijiang Normal University,
Neijiang 641112, Sichuan, China;

2. Geosciences College of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Duobuza Cu deposit is a super-large porphyritic Cu deposit discovered in Duolong ore-deposit-clustered area in recent years. Gold content is relatively high in the ore. Pyrite is one of the important gold carriers and its characteristics of morphology, thermoelectricity and composition typomorph are studied. The results show that gold mineralization is clearly correlated with the characteristics and they are significant to understand genetic types of the ore, ore material and ore fluid sources and genesis of the Cu deposit. During mineralization value of $N(S)/N(Fe)$, δFe , δS decrease and value of $w(Co)/w(Ni)$ increase, value of $w(Co)$ and $w(Ni)$ decrease, value of $w(Se)$ increase, value of $w(S)/w(Se)$ decrease, value of $w(As)$, $w(Ag)$ and $w(Au)$ gradually and Cu, Au, Ag are positively correlated and the pyrite is characterized by relatively enrichment of LREE and relatively depletion of HREE which are the indications of magmatic hydrothermal fluid genesis of the deposit. Evolution of REE composition of the pyrite from positive Eu anomaly to negative Eu anomaly is the evidence for magma-hydrothermal fluid evolution of the deposit.

Key Words: Duobuza Cu deposit; pyrite; characteristics of composition typomorph; Tibet