

文章编号: 0258-7106 (2005) 01-0071-10

东川蓑衣坡硅质岩型铜矿床的地质地球化学特征及成因*

李 毅^{1,3}, 李赋屏^{2,3}, 何国朝³

(1 中南大学地学与环境工程学院, 湖南 长沙 410083; 2 中国地质大学地学院, 北京 100083;

3 桂林矿产地质研究院, 广西 桂林 541004)

摘 要 蓑衣坡硅质岩型铜矿床产于元古宙裂谷带, 矿化主岩为块状硅质岩和条纹(带)状硅质岩; 块状硅质岩的 SiO_2 含量为 85.66% ~ 96.74%, 条纹(带)状硅质岩的 SiO_2 含量为 74.83% ~ 87.52%; 在 TiO_2 - Al_2O_3 和 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ - Al_2O_3 关系图上和 $(\text{Co} + \text{Ni})$ -($\text{As} + \text{Cu} + \text{Mo} + \text{Pb} + \text{V} + \text{Zn}$) 关系图上, 其成分投影点均落入与海底热水系统有关或热水沉积岩区的硅质岩区; 蓑衣坡矿区矿石的稀土元素总量变化大, 且显示轻稀土元素富集, 叠加的成矿作用引起轻稀土元素含量升高; 并具铈负异常、铈异常不明显的特点。矿石内矿物流体包裹体的均一温度为 121 ~ 257 °C, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 6.2% ~ 8.3%, 成矿流体属 K^+ - Ca^{2+} - SO_4^{2-} 型和 K^+ - Mg^{2+} - SO_4^{2-} 型。矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -14.8‰ ~ +17.2‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 4.9‰, 矿石中石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 12.4‰ ~ 16.3‰, 位于热泉型石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化区间(12.2‰ ~ 23.6‰)。矿石中黄铁矿内流体包裹体的 δD 值为 -116.2‰, 其 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -5.7‰, 接近美国黄石公园酸性热泉的 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。含矿硅质岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 17.947 ~ 18.951, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.606 ~ 15.711, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 36.466 ~ 38.496。根据矿床地质地球化学特征, 笔者认为, 蓑衣坡硅质岩型铜矿床的成因类型属裂谷处于拉张裂陷阶段发生的喷流沉积作用形成的硅质岩型铜矿床。

关键词 地质学; 硅质岩型铜矿床; 地质地球化学特征; 蓑衣坡

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

东川铜矿是我国重要的铜矿资源基地之一, 曾有许多学者在该地开展过找矿工作, 并从不同的角度对其成矿规律、控矿因素及成矿机理进行了论述(龚琳等, 1996; 冉崇英, 1990; 涂光炽, 1988)。其中, 林文达等(1995)提出, 东川滥泥坪存在一套热水沉积岩, 与之相伴的硅质岩铜矿是东川铜矿成矿系列中的一个新类型。但是, 对该类型铜矿尚未有人做过详细研究。在东川滥泥坪矿区蓑衣坡矿段, 笔者对其深部硅质岩型铜矿床开展了野外矿床地质研究工作, 对该矿床的矿化主岩进行了岩石化学分析, 对矿石(矿物)的微量元素、稀土元素、流体包裹体及同位素等进行了全面系统的测试分析, 归纳了该矿床的地质地球化学证据, 并提出了该矿床的成因类型。

1 蓑衣坡硅质岩型铜矿床的地质特征

1.1 区域地质构造背景

东川铜矿位于川滇南北向构造带中段的东缘

(图1), 矿化赋存在中元古界昆阳群因民组的中上部。根据沉积建造的特点及其空间分布, 结合区域地球物理场(地壳厚度重力异常、磁异常)特征, 笔者认为, 因民组是在裂谷处于主拉张裂陷发育阶段形成的。在拉张裂陷发育过程中, 同沉积断裂活动活跃, 造成谷底地形反差大, 岩相变异明显, 火山活动频繁, 形成了汤丹型、小水井型、稀矿山型和蓑衣坡型等4种类型沉积组合。硅质岩型铜矿产于蓑衣坡型沉积组合中。

蓑衣坡型沉积组合的因民组分为6个岩性段, 自下而上依次为火山-沉积砾岩段、沉凝灰岩段(下)、铁矿层段、沉凝灰岩段(上)、紫色岩层段和硅质岩段。硅质岩段的硅质岩是铜矿化的主岩。

1.2 矿化主岩的岩性特征

蓑衣坡硅质岩型铜矿床的矿化主岩是产于因民组上部的硅质岩, 出露于标高2873 m以下的蓑衣坡矿段的VI、VII、VIII及XIII等中段。VII中段的硅质岩, 其

* 本文得到原中国有色金属工业总公司生产矿山周边二轮找矿专项(中色铜矿字第1992023号文)及科学技术部大型锡矿山接替资源探查技术与示范项目(2004BA615A-03)资助

第一作者简介 李 毅, 男, 1963年生, 高级工程师, 中南大学地学与环境工程学院博士研究生, 长期从事地质找矿研究工作。

收稿日期 2004-03-29; 改回日期 2004-06-28。

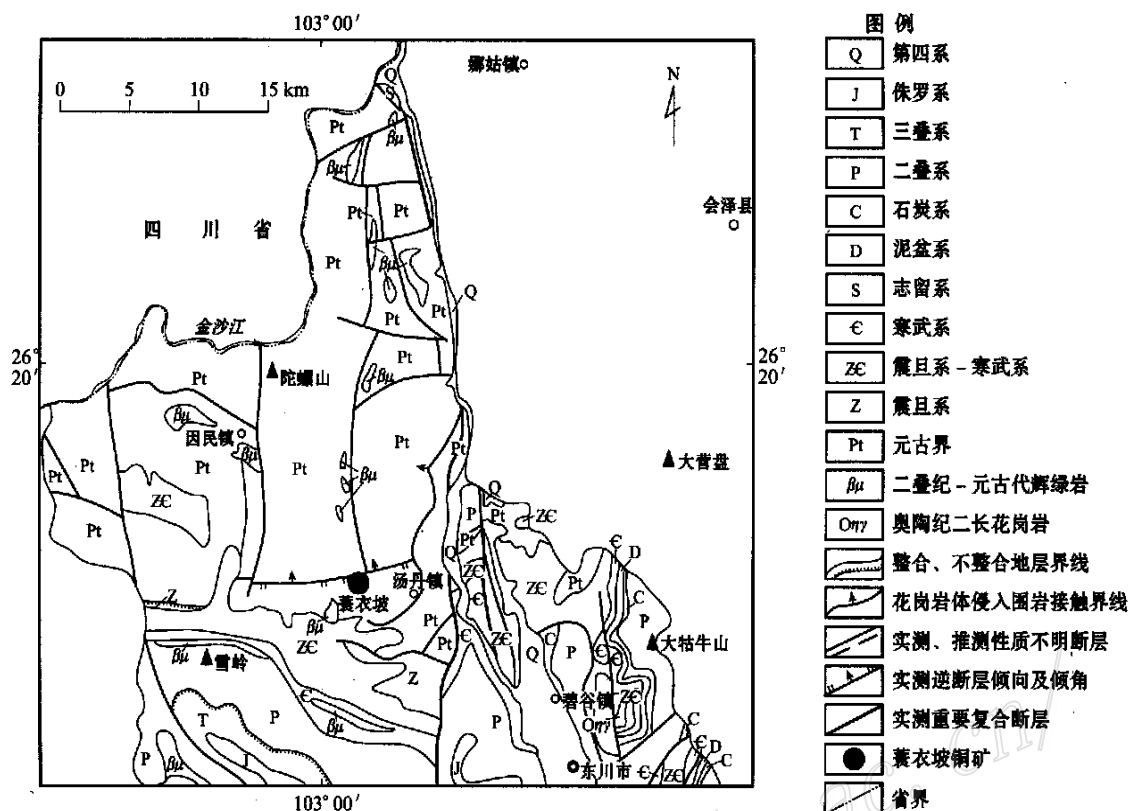


图1 东川蓑衣坡铜矿区地质略图(据 1:500,000 地质图改编)

Fig.1 Regional geological sketch map of the Suoyipo copper deposit, Dongchuan (modified after 1:500,000 Geological Map)

厚度较大,向外渐次变薄,尖灭,呈透镜状地质体产出,与上、下岩层整合接触。

硅质岩主要呈灰色、浅肉红色,一般不具层理,主要矿物为石英、硅粒(屑),次要矿物有绢云母、赤铁矿、碳酸盐、有机质,还有少量电气石、磷灰石和硫化物。石英为自生石英,呈他形粒状和不规则状产出,其边界棱角清晰。硅粒(屑)是由微晶、细晶状石英(粒径为 0.01 ~ 0.05 mm)组成的集合体,不具陆源碎屑特征。经重结晶作用,硅质岩的石英粒度变粗。岩石具紧密镶嵌的半自形粒状结构,块状和条纹(带)状构造。

根据岩石的矿物组成、产状和结构构造特征,将硅质岩划分为两类:块状硅质岩和条纹(带)状硅质岩。

块状硅质岩产于硅质岩体的中部,主要由微晶石英组成,其粒度较粗,含少量的黄铁矿、白云石和黄铜矿、斑铜矿等。岩石具半自形粒状结构,块状构造。

条纹(带)状硅质岩产于块状硅质岩的外侧,由硅质条纹(带)、碳酸盐条纹(带)和碳泥质条纹(带)

组成,以硅质条纹(带)为主。碳泥质条纹(带)常呈弯曲状条纹(带)或薄膜夹于硅质条纹(带)之间,其中常含有黄铁矿莓球,偶见黄铜矿莓球。条纹(带)状硅质岩含有数量不等的硫化物、绢云母、方解石及碳质物。岩石具他形-半自形微细粒结构、条纹(带)状构造。

1.3 矿化特征

蓑衣坡硅质岩型铜矿床的矿化严格地受地层层位和岩性控制。矿化主要呈条带状和浸染状,产于中元古界昆阳群因民组上部硅质岩内,矿体呈似层状或透镜状产出,其产状与地层产状一致,走向 NE 65 ~ 74°,倾向 NW,倾角 14 ~ 27°。蓑衣坡硅质岩型铜矿床矿体的主要特征见表 1。

根据矿石的产状、矿物组成、结构构造和矿化主岩的岩性特征,将蓑衣坡硅质岩型铜矿床的矿石分为两类:块状矿石和条纹(带)状矿石。

块状铜矿石产于块状硅质岩内,主要赋存在矿区中部(VII中段),其次为矿区北部(VI中段)。其主要金属矿物是黄铁矿、黄铜矿,有少量斑铜矿、辉铜矿。非金属矿物是石英、白云石、绢云母和碳质等。

表 1 蓑衣坡硅质岩型铜矿床矿体的主要特征

Table 1 Main geological characteristics of the Suoyipo copper deposit

容矿岩石 揭露地段	形态	产状	厚度/ m	品位/ w _B / %	矿化组合	脉石矿物	构造发育 状况	矿化程度	延深斜距 / m
Ⅵ-4 巷	层状	315° ∠170°	4.89	0.6 ~ 2.42	黄铁矿、黄铜 矿	石 英、白 云 石、碳质	NW、NE 向两组 断裂发育	富集	250
Ⅶ中段	层状	355° ∠25°	7.45	1.26 ~ 11.4	黄铁矿、黄铜 矿、斑铜矿	石 英、绢 云 母、碳质	NW、NE 向两组 断裂发育	富集	270
Ⅷ中段	层状		5.46	0.37 ~ 0.48	黄铁矿(黄铜 矿)	石英、白云母、 绢云母	NW、NE 向两组 断裂发育	贫	

矿石内的黄铁矿主要呈他形晶产出,粒度较细(0.05 ~ 0.1 mm)。

条纹(带)状铜矿石赋存在条纹(带)状硅质岩中,主要分布在矿区南部和北部(Ⅵ中段和Ⅷ中段)。其主要金属矿物是黄铁矿和黄铜矿,有少量或微量的斑铜矿,未见辉铜矿。非金属矿物是石英、白云石、绢云母、碳酸盐类等。矿石内的黄铁矿呈立方体和五角十二面体的自形-半自形晶产出,粒度较粗(0.5 ~ 1 mm)。黄铜矿一般呈细粒他形晶,粒度为 0.01 ~ 0.05 mm,与他形的黄铁矿密切相伴产出,两者相互嵌生。

蓑衣坡矿区还存在石英脉型铜矿化。野外观察表明,这类铜矿化仅见于块状硅质岩内,其矿石的矿物共生组合与块状硅质岩内的块状铜矿石一致,金属矿物为黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿,非金属矿物为石英和白云石。含石英英脉的宽度为 1 m 左右,最宽处可达 2 m,矿脉的形态、产状特征显示,它们是由含矿流体充填张性裂隙而成。

表 1 资料还表明,产于Ⅶ中段的块状硅质岩型铜矿石,其铜品位为 1.26 % ~ 11.4 %,产于Ⅷ中段的条纹(带)状硅质岩型铜矿石,其铜品位为 0.37 % ~ 0.48 %,前者明显高于后者。

蓑衣坡硅质岩型铜矿体存在着矿化分带,即自矿体的中部向其南、北两侧,矿化特征表现出规律性变化:①矿体中部为块状硅质岩型矿石,南、北两侧渐变为条纹(带)状硅质岩型矿石,且矿石的铜品位相应地由富变贫;②矿体中部的矿石,其铜矿物为黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿,而矿体南、北部的矿石,其铜矿物为黄铜矿(矿体北部出现的含斑铜矿的矿石,仅见于靠近块状硅质岩型矿化的部位);③矿体中部还出现石英脉型铜矿化,而矿体南、北部缺失石英脉型铜矿化;④矿体中部的黄铁矿是他形晶细粒黄铁矿,而矿体南、北部的黄铁矿是立方体或五角十二面体黄铁矿,且粒度较粗,他形的细粒黄铁矿含量极少。

1.4 矿石的结构、构造特征

1.4.1 矿石结构

(1) 包含结构:见于条纹(带)状和浸染状矿石中,表现为粗大的自形-半自形黄铁矿晶粒包含黄铜矿、斑铜矿等矿物,被包含的矿物多呈他形晶或浑圆状产出,粒径一般小于 0.02 mm。表明黄铁矿形成晚于黄铜矿、斑铜矿。

(2) 乳浊状结构:黄铜矿、斑铜矿呈细小乳滴状,无规律地分散在黄铁矿内。这类矿石结构见于条纹(带)状、浸染状和脉状矿石中。

(3) 压碎结构:黄铁矿、黄铜矿呈碎裂状颗粒产出,具棱角的碎片之间略显一定的熔融现象,碎片粒径大多相近。

(4) 镶边结构和网状结构:他形黄铁矿沿自形黄铁矿的边缘向中心交代,形成镶边结构;或沿裂隙、解理交代,形成网状结构。黄铜矿沿黄铁矿解理、裂隙交代,形成网状结构。

(5) 自形或半自形变晶结构:石英和白云石经重结晶作用,使粒径增大,自形程度增高。

1.4.2 矿石构造

(1) 条带状构造:黄铁矿、黄铜矿等金属硫化物组成连续或断续条带沿层理分布,与围岩产状一致,随围岩同步褶曲变形。

(2) 浸染状构造:黄铜矿、黄铁矿呈条纹浸染状、稀疏浸染状或稠密浸染状产于矿石中,形成各种浸染状构造。

(3) 脉状构造:见于矿区中部,由含矿流体充填于块状硅质岩的裂隙内,形成脉状铜矿化,其脉壁清晰。

2 蓑衣坡铜矿床的地球化学特征

2.1 矿化主岩的岩石化学特征

蓑衣坡硅质岩型铜矿床的矿化主岩为硅质岩,硅质岩的岩石化学资料见表 2。据现有资料,提出以

表 2 蓑衣坡硅质岩型铜矿床内硅质岩的岩石化学成分 (wt %)

Table 2 Petrochemical composition of siliceous rocks in the Suoyipo copper deposit (wt %)

序号	矿床类型及样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总和
蓑衣坡式铜矿块状硅质岩														
1	L64-22	89.28	0.25	2.62	1.66	1.97	0.12	0.43	0.40	0.03	0.96	0.28	1.60	99.60
2	L7-20	93.04	0.088	1.80	0.80	0.50	0.08	0.47	1.31	0.028	0.72	0.06	1.77	100.67
3	L64-23	86.02	0.088	1.79	5.13	2.84	0.09	0.31	0.11	0.012	0.51	0.04	3.94	100.88
4	L7-24	85.96	0.13	3.01	2.71	1.16	0.13	0.94	1.96	0.028	0.95	0.08	3.88	100.94
5	L64-14	95.83	0.044	1.33	0.48	0.87	0.09	0.79	0.22	0.02	0.36	0.06	0.65	100.74
6		85.66	1.17	3.18	0.86	3.66	0.06	1.30	1.44	0.05	0.61	0.77	1.18	99.94
7		89.82	0	1.98	1.18	2.33	0.10	1.30	1.78	0.05	0.48	0.14	1.72	100.88
8		91.05	0	2.15	0.51	1.74	0.03	0.59	0.72	0.03	0.64	0.24	1.28	98.98
9		91.34	0.07	1.98	1.29	1.93	0.04	0.50	0.63	0.04	0.54	0.06		100.12
10		96.74	0	0.73	0.98	0.86	0.03	0.64	0.43	0.03	0.20	0.04	0.50	101.18
11		92.86	0.09	2.19	1.80	0.71	0.03	0.57	0.52	0.02	0.79	0.17	1.24	100.99
平均值		90.69	0.175	2.07	1.58	1.69	0.07	0.71	0.86	0.03	0.61	0.18		
蓑衣坡式铜矿条纹(带)状硅质岩														
12	L7-17	74.84	0.22	3.48	10.85	0.79	0.09	0.69	0.53	0.03	1.24	0.21	6.38	99.35
13	L8-16	74.83	0.40	9.64	1.60	1.08	0.11	2.80	1.57	0.05	3.37	0.28	4.52	100.25
14	L8-21	83.31	0.17	2.32	7.11	0.67	0.12	0.31	1.07	0.02	0.86	0.08	4.48	100.52
15		74.92	0.16	4.00	3.90	1.43	0.07	2.74	3.58	0.03	1.52	0.10	6.80	99.25
16		87.52	0.22	3.10	0.96	2.47	0.07	1.53	0.88	0.06	0.70	0.11	2.24	99.86
平均值		79.08	0.23	4.51	4.88	1.29	0.09	1.61	1.53	0.04	1.54	0.16	4.88	
与生物成因有关的硅质岩(8)														
17		88.04	0.016	0.84	1.59	0.26	0.30	0.19	5.07	0.18	0.16	0.03		100.07
与火山活动有关的硅质岩(9)														
18		68.14	0.55	12.63	1.45	5.80	0.15	1.97	0.78	3.50	1.68	0.11	2.25	99.01
大厂矿区的硅质岩(5)														
19		73.68	0.25	5.65	2.06	4.13	0.08	0.79	5.93	0.05	1.37	0.13	5.50	99.62

序号 1~5 及 12~14 为本次研究成果,测试单位:桂林矿产地质研究院分析测试中心;6~11 及 15~16 为引自林文达等,1995;17 为引自 Хотин,1972;18 为引自王京彬等,1998;19 为引自韩发等,1989。() 内为样品数。

下认识:

(1) 岩石化学资料表明,蓑衣坡矿区存在两种硅质岩,两者的岩石化学特征明显不同。块状硅质岩的 SiO₂ 含量高 (85.66% ~ 96.74%, 平均为 90.69%), Fe₂O₃、MgO、CaO、K₂O 及烧失量含量低; 条纹(带)状硅质岩的 SiO₂ 含量低 (74.83% ~ 87.52%, 平均为 79.08%), Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、CaO、K₂O 及烧失量含量较高。

(2) 前人研究成果 (Pollock, 1987; Хотин, 1972; 王京彬等, 1998; 郑明华, 1994; 韩发等, 1989) 表明,硅质岩具多成因特征,不同成因的硅质岩,其岩石化学特征不同。在表现不同成因硅质岩的 TiO₂-Al₂O₃ 和 (K₂O + Na₂O)-Al₂O₃ 关系图(图 2、图 3)上,蓑衣坡矿区矿化主岩的投影点均落入与海底热水系统有关的硅质岩展布区。

2.2 矿石的微量元素含量特征

表 3 提供了蓑衣坡硅质岩型铜矿床矿石的微量

元素含量资料,从中获得以下认识:

(1) 块状硅质岩型矿石展布区(VII中段)的矿石,铜品位较高,且品位变化较小;条纹(带)状硅质岩型矿石展布区(VI中段和 VIII中段)的矿石,其铜品位较低,且品位变化大。为了揭示其微量元素的含量及变化特征,笔者计算了它们的平均含量及其方差(表 3),结果显示,块状硅质岩的 Pb、Zn、Ni、Mn 和 Ba 的平均含量及其方差,均大于条纹(带)状硅质岩相应元素的平均含量及其方差;而 Co、V、Ti 等元素的平均含量及其方差,块状硅质岩则小于条纹(带)状硅质岩。

如果以 0.2% 和 0.5% 为界,划分出矿化岩、贫矿石和富矿石,可以发现,三者的微量元素含量特征不同。矿石(贫矿石和富矿石)的 Zn、Co、Ni、Ti、Ba 等元素的含量较高,而矿化岩的相应元素含量低;富矿石的 (Co + Ni + V) 含量为 $79.1 \times 10^{-6} \sim 260.0 \times 10^{-6}$, 平均含量为 164.0×10^{-6} ; 贫矿石的 (Co + Ni

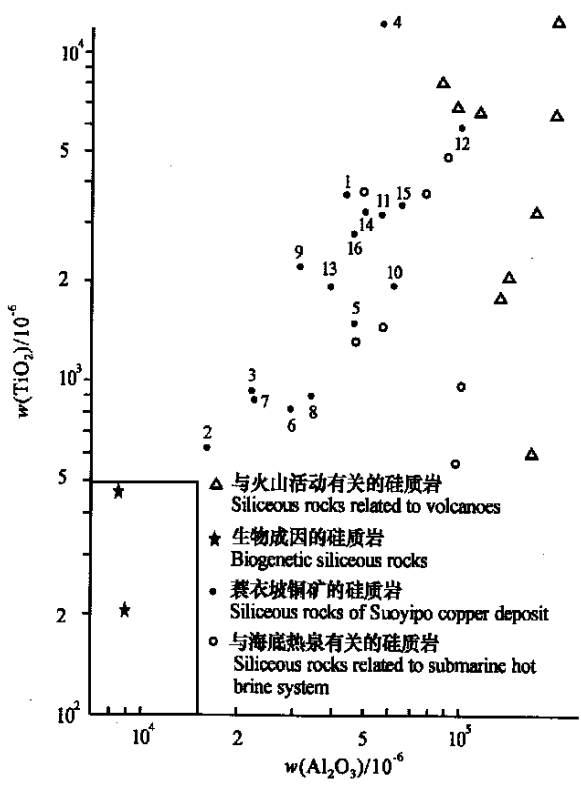


图 2 硅质岩的 TiO₂-Al₂O₃ 投影图(据韩发等,1989)

Fig.2 TiO₂-Al₂O₃ diagram of siliceous rocks
(after Han et al. , 1989)

+ V) 含量为 $64.7 \times 10^{-6} \sim 79.2 \times 10^{-6}$, 平均含量为 71.9×10^{-6} ; 矿化岩的 (Co + Ni + V) 含量小于 $17 \times 10^{-6} \sim 49.2 \times 10^{-6}$, 平均含量为 34.2×10^{-6} 。

(2) 在 Nichlson 设计的判别图解中,蓑衣坡矿区的矿石和矿化岩,其微量元素含量的投影点全部

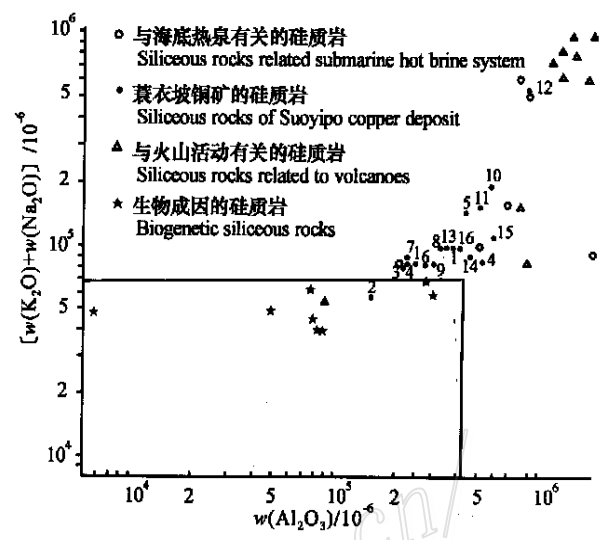


图 3 硅质岩的 (K₂O+Na₂O)-Al₂O₃ 投影图
(据韩发等,1989)

Fig.3 (K₂O+Na₂O)-Al₂O₃ diagram of siliceous rocks
(after Han et al. , 1989)

表 3 蓑衣坡硅质岩型铜矿床硅质岩微量元素特征

Table 3 Trace element contents of siliceous rocks in the Suoyipo copper deposit

岩石名称 及样品号	采样位置	$w_B/10^{-6}$											Ti/ V	Ni/ Co
		Cu	Pb	Zn	Co	Ni	Cr	V	Mn	Ti	Sr	Ba		
块状硅质岩														
L64-7	VII中段	>5000	26.8	231.5	41.4	133.7	51.5	43.8	750.0	1643.0	22.0	732.3	37.5	3.21
L64-14	VII中段	1059.6	75.6	18.1	<2.5	<5.0	32.1	9.5	902.0	427.0	5.4	143.8	44.9	1.43
L64-22	VII中段	347.6	190.6	20.4	3.7	<5.0	49.8	40.5	611.0	1030.0	15.4	97.9	25.4	1.35
L7-20	VII中段	>5000	33.7	24.8	26.8	20.3	60.9	32.0	889.0	1091.0	19.4	1488.4	34.1	0.78
L7-24	VII中段	2634.2	12.3	47.2	8.8	17.1	44.8	38.8	1193.0	924.0	15.9	398.8	23.8	1.34
平均值		2808.3	68.8	68.4	16.6	36.2	47.8	32.9	869	1023	15.6	572	31.1	2.20
方差		18750404	21047	33786	1141	12071	4445	759	187190	754090	160	1305028		
条带状硅质岩														
L64-1	VI中段	531.4	<7.5	9.8	11.2	26.4	50.7	9.4	1712.0	277.0	15.4	34.6	29.4	2.36
L7-17	VII中段	>5000	72.4	28.5	53.4	21.1	62.6	23.7	742.0	1261.0	15.4	996.8	53.2	0.39
L8-12	VIII中段	85.6	<7.5	<7.5	<2.5	<5.0	31.5	16.5	1352.0	387.0	15.4	43.5	23.5	1.42
L8-10	VIII中段	21.9	<7.5	7.5	<2.5	16.1	29.9	14.0	852.0	803.0	15.4	77.4	57.4	4.60
L8-16	VIII中段	>5000	10.7	28.0	32.2	107.6	56.2	120.2	1108.0	3756.0	26.4	738.9	31.3	3.34
L8-21	VIII中段	454.8	14.8	12.1	19.7	18.1	92.1	41.9	1038.0	1282.0	15.4	9.1	30.6	0.92
L8-24	VIII中段	2926.7	9.0	44.0	28.3	28.8	53.1	22.1	1183.0	1350.0	15.4	432.4	81.1	2.10
平均值		2002.9	18.5	19.6	21.4	31.9	53.7	35.4	35.4	1302	16.9	333.2	36.8	1.02
方差		30980949	3432	1190	2037	7051	2629	9038	9038	8163352	104	948496		

测试单位:桂林矿产地质研究院分析测试中心。

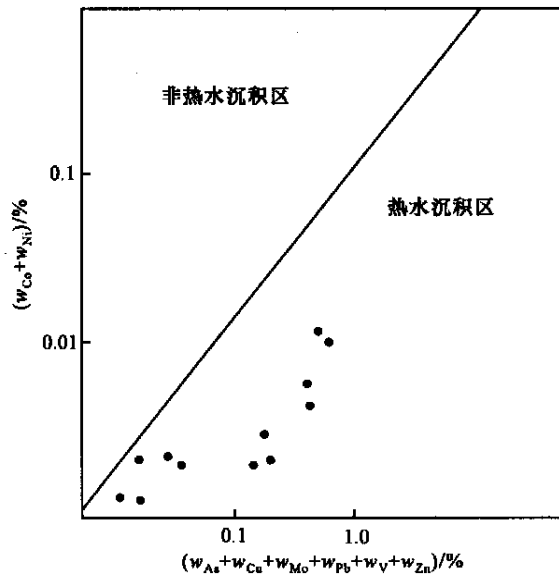


图 4 蓑衣坡铜矿床硅质岩微量元素判别图
Fig.4 Discriminant diagram of trace elements
in the Suoyipo copper deposit

落入热水沉积区(图 4)。

2.3 矿石的稀土元素组成特征

蓑衣坡硅质岩型铜矿区矿石的稀土元素含量及组成特征资料见表 4,其稀土元素配分曲线如图 5 所示。图表资料表明:

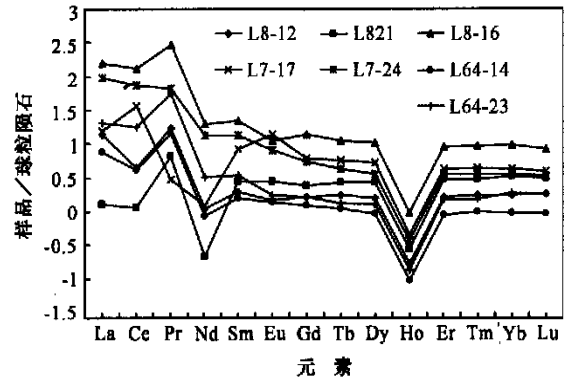


图 5 蓑衣坡铜矿床硅质岩稀土元素配分模式图
Fig.5 Chondrite-normalized REE patterns of siliceous
rocks in the Suoyipo copper deposit

表 4 蓑衣坡硅质岩型铜矿床硅质岩稀土元素地球化学特征 ($u_B/10^{-6}$)

Table 4 Rare earth element composition of siliceous rocks in the Suoyipo copper deposit ($u_B/10^{-6}$)

样品号	L8-12	L8-21	L8-16	L7-17	L7-24	L64-14	L64-23
La	4.28	0.40	49.0	4.84	29.23	2.40	6.36
Ce	3.63	0.92	104.9	29.38	59.44	3.36	14.37
Pr	2.08	0.793	36.62	0.366	8.037	1.756	6.779
Nd	0.66	0.13	11.93	0.75	8.06	0.52	1.93
Sm	0.39	0.55	4.31	1.68	2.64	0.31	0.67
Eu	0.11	0.21	0.83	1.10	0.60	0.10	0.13
Gd	0.43	0.63	3.57	1.59	1.44	0.32	0.42
Tb	0.083	0.127	0.543	0.267	0.206	0.052	0.062
Dy	0.52	0.87	3.32	1.69	1.16	0.30	0.41
Ho	0.119	0.198	0.682	0.328	0.266	0.069	0.099
Er	0.34	0.63	1.93	0.92	0.76	0.19	0.32
Tm	0.058	0.099	0.302	0.147	0.118	0.032	0.05
Yb	0.37	0.69	2.01	0.89	0.75	0.20	0.40
Lu	0.06	0.103	0.285	0.132	0.113	0.031	0.06
Y	3.17	5.17	17.8	9.39	6.46	1.80	2.67
ΣREE	16.25	11.52	238.09	53.57	119.28	11.44	34.73
LREE/HREE	2.19	0.353	6.821	2.482	9.580	2.821	6.733
Eu/Eu*	0.818	1.088	1.589	1.863	0.855	0.963	0.699
Ce/Ce*	0.291	0.292	0.567	3.907	0.919	0.376	0.468

测试单位:湖北省地质测试中心。* 比值单位为 1。

(1) 蓑衣坡硅质岩型铜矿石的 ΣREE 为 $11.44 \times 10^{-6} \sim 238.09 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值为 $2.19 (0.353) \sim 9.58$, δCe 值为 $0.291 \sim 0.919 (3.907)$, δEu 值为 $0.699 \sim 1.863$ 。表明蓑衣坡矿区的矿石具有稀土元素总量变化大、轻稀土元素富集、绝大部分具铈的负异常、铈的异常不明显等特征。

(2) 根据稀土元素含量及其配分曲线特征,可以将它们分为两组。第一组由 L8-16、L7-17、L7-24 号样品构成,第二组由 L8-12、L8-21、L64-14、L64-23 号样品构成。前者的稀土元素总量高, LREE/HREE 比值较大, δCe 值、 δEu 值较高;后者的稀土元素总量较低, LREE/HREE 比值较小, δCe 值、 δEu 值较低。

(3) 矿石的稀土元素含量特征与矿化主岩的岩性特点及铜品位具一定关系。第一组的铜品位较高;第二组的铜品位较低。

(4) 在稀土元素配分模式图上,第一组样品的曲线,协调性差;第二组样品的曲线,协调性好。反映出铜品位较高的矿石受到叠加的成矿作用(形成石英脉型铜矿化),使其稀土元素组成特征发生改变(轻稀土元素含量升高)。

2.4 矿物流体包裹体特征

蓑衣坡硅质岩型铜矿床的矿物流体包裹体特征(表 5)表明,矿石中的石英,其流体包裹体形态复杂,常呈不规则状、扁圆形和椭圆形产出,呈面状或线状分布;包裹体体积细小,直径一般为 $3 \sim 7 \mu\text{m}$,流体包裹体类型单一,属液相包裹体,其气相百分数为 5%。均一法测温(未作压力校正)获得包裹体形成

温度为 $121 \sim 257\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均温度为 $143 \sim 229\text{ }^{\circ}\text{C}$;盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $6.2\% \sim 8.3\%$ 。据此推测,蓑衣坡硅质岩型铜矿床的成矿流体属低盐度的中低温热液。

流体包裹体成分资料(表 6)显示,其 K^{+} , Na^{+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等含量较高,据此可以确定,蓑衣坡硅质岩型铜矿床的成矿流体属于 $\text{K}^{+}-\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$ 型和 $\text{K}^{+}-\text{Mg}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$ 型。

结合地质产状及样品的铜品位分析,采自 VII 中段块状硅质岩的样品和铜品位超过 0.2% 的样品,其阳离子和阴离子浓度明显地高于采自条纹(带)状硅质岩的样品和铜品位低于 0.2% 的样品。

2.5 矿床的同位素组成特征

经测定,蓑衣坡硅质岩型铜矿床内黄铁矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围大,为 $-14.8\% \sim +17.2\%$ (表 7),极差达 32%,其中 3 个负值的平均值为 -11.6% ,正值为 $+17.2\%$ 。这些资料表明,该矿床成矿作用的硫源不是单一来源(详细情况另文讨论)。

含矿硅质岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 4.9% ,与火山沉积硅质岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值($1.9\% \sim 5.2\%$)一致。含矿硅质岩石英三件样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 12.4% 、 15.8% 和 16.3% (表 8),平均值为 14.8% ,位于热泉型石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化区间($12.2\% \sim 23.6\%$)。

黄铁矿内流体包裹体的 δD 值为 -116.2% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -5.7% ,在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图上,其投影点位于大气降水线的右下方、变质水和原生岩浆水范围之外,接近美国黄石公园的酸性热泉的 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

五件含矿硅质岩的铅同位素组成资料见表 9,据

表 5 蓑衣坡硅质岩型铜矿床矿物包裹体特征
Table 5 Fluid inclusion characteristics of quartz in the Suoyipo copper deposit

岩石类型 及样品号	采样位置	包裹体大小 / μm	包裹体类型	气相百分数 / %	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$		盐度/ %
					范围	平均值	
条纹(带)状硅质岩							
L8-17	VIII中段	3 ~ 6	液相	5	130 ~ 158	146	8 .3
L8-19	VIII中段	3 ~ 7	液相	5	133 ~ 278	179	
L8-20	VIII中段	3 ~ 6	液相	5	121 ~ 163	143	
L8-23	VIII中段	3 ~ 7	液相	5	120 ~ 214	157	
L8-24	VIII中段	3 ~ 7	液相	5	183 ~ 257	229	6 .2
条纹(带)状硅质岩							
L7-18	VII中段	3 ~ 6	液相	5	145 ~ 240	210	
L7-21	VII中段	3 ~ 7	液相	5	130 ~ 204	165	
块状硅质岩							
L64-7	VII中段	3 ~ 7	液相	5	153 ~ 213	190	

测试单位:桂林矿产地质研究院分析测试中心。

表 6 蓑衣坡硅质岩型铜矿床矿物包裹体成分组成特征 ($w_B/10^{-6}$)

Table 6 Gaseous and fluid composition of inclusions in the Suoyipo copper deposit($w_B/10^{-6}$)

	块状硅质岩				条带状硅质岩			
	L7-20	L7-20	L64-14	L7-24	L8-10	L8-12	L8-21	L8-24
Cu 含量	> 5000	> 5000	1059.6	2634.2	85.6	21.9	454.8	2926.7
测试矿物	黄铁矿	石英	石英	石英	石英	石英	石英	石英
K ⁺	14.79	35.74	60.62	45.83	26.96	131.06	34.79	7.86
Na ⁺	9.59	3.73	3.41	6.36	5.09	2.08	2.07	2.34
Ca ²⁺	35.46	2.96	21.6	216.65	68.19	46.04	56.37	57.12
Mg ²⁺	5.6	11.41	6.45	46.89	14.40	127.25	35.75	23.94
Li ⁺	0.013	0.043	0.075	0.11	0.14	0.077	0.032	0.053
F ⁻	0.82	1.568	1.147	1.035	1.033	3.071	1.299	0.554
Cl ⁻	17.6	4.27	3.77	6.04	4.35	3.87	5.06	4.51
SO ₄ ²⁻	255.4	136.4	64.79	127.3	312.76	99.5	125.65	163.18
H ₂ O	783	1910	376	427	1701	340	5.4	526
Na ⁺ / K ⁺ *	0.65	0.10	0.06	0.14	0.04	0.02	0.06	0.03
Ca ²⁺ / Mg ²⁺ *	6.33	0.26	3.35	4.61	4.74	0.36	1.58	2.39
F ⁻ / Cl ⁻ *	0.05	0.37	0.30	0.17	0.24	0.79	0.26	0.12
SO ₄ ²⁻ / Cl ⁻ *	14.51	31.96	17.17	54.23	71.90	25.68	24.86	36.20
包裹体成分类型	K ⁺ -Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Mg ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Mg ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻	K ⁺ -Ca ²⁺ -SO ₄ ²⁻

测试单位:桂林矿产地质研究院分析测试中心。* 比值单位为 1。

表 7 蓑衣坡硅质岩型铜矿床硫同位素组成特征

Table 7 Sulfur Isotope compositional characteristics of the Suoyipo copper deposit

样品号	采样位置	岩石类型	$\delta^{34}S/‰$
L7-20	VII中段	块状硅质岩	-17.2
L7-24	VII中段	块状硅质岩	-8.2
L8-16	VIII中段	条纹(带)状硅质岩	-11.8
L8-21	VIII中段	条纹(带)状硅质岩	-14.8

测试仪器及精度: MAT-230 质谱仪,以 CDT 为标准,分析精度为 $\pm 0.5‰$;测试单位:桂林矿产地质研究院同位素室。

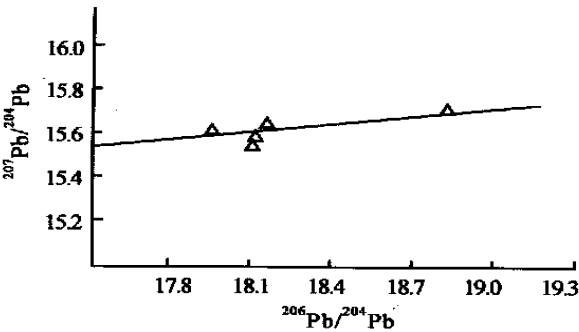


图 6 蓑衣坡硅质岩铜矿铅同位素²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 投影图

Fig.6 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb versus ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb diagram of the Suoyipo copper deposit

其绘制出图 6 和图 7。据图表资料,可归纳出蓑衣坡硅质岩型铜矿区的铅同位素组成特征:①²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 比值为 17.947 ~ 18.951,变化率为 5.48%;²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 比值为 15.606 ~ 15.711,变化率为 0.6%;²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 比值为 36.466 ~ 38.496,变化率为 5.37%,属异常铅。②在²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 坐标图(图 6)上,投影点呈现较好的线性关系;在²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 坐标图(图 7)上,投影点分散,处理后得铅斜率 R = 0.0968,相关系数 K =

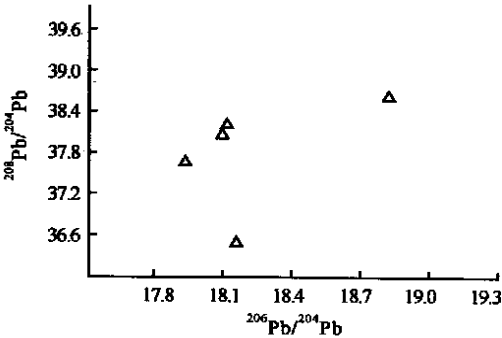


图 7 蓑衣坡硅质岩铜矿铅同位素²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 投影图

Fig.7 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb versus ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb diagram of the Suoyipo copper deposit

表 8 蓑衣坡硅质岩型铜矿床氧同位素组成特征

Table 8 Oxygen isotope compositional characteristics of the Suoyipo copper deposit

样品号	采样位置	岩石类型	测定(岩石)矿物	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}(\text{SMOW})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}(\text{SMOW})$	$\delta\text{D}/\text{‰}(\text{SMOW})$	备注
				矿物	计算包裹体水	包裹体水	
L7-20	VII中段	块状硅质岩	硅质岩	4.9			包裹体水
L7-20	VII中段	块状硅质岩	黄铁矿		-5.7	-116.2	计算水
L7-20	VII中段	块状硅质岩	石英	12.4	3.42		包裹体水
L7-24	VIII中段	块状硅质岩	石英	15.8	6.9		包裹体水
L8-21	VIII中段	条带状硅质岩	石英	16.3	7.3		包裹体水

测试仪器及精度: MAT-930 质谱仪,以 SMOW 为标准, $\delta^{18}\text{O}$ 的分析精度为 2 ‰, δD 的分析精度为 1 ‰;测试单位: 桂林矿产地质研究院同位素室。

表 9 蓑衣坡硅质岩型铜矿床铅同位素组成特征

Table 9 Lead isotope compositional characteristics of the Suoyipo copper deposit

样品号	采样位置	矿(岩)石名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ
L64-7	VII中段	块状硅质岩	18.178	15.658	36.466	10.718
L7-20	VII中段	块状硅质岩	18.139	15.609	38.139	10.671
L7-24	VII中段	块状硅质岩	18.136	15.606	38.220	10.667
L8-10	VIII中段	条带状硅质岩	17.947	15.628	37.743	10.439
L8-16	VIII中段	条带状硅质岩	18.951	15.711	38.496	11.652

测试仪器: MAT-260 质谱仪,引用标准为 NBS981;测试单位: 桂林矿产地质研究院同位素室。

0.8682,求得放射成因铅母体的最大年龄值为 1562.56 Ma。

3 结 论

(1) 蓑衣坡硅质岩铜矿产于中元古界昆阳群因民组上部硅质岩内,矿体呈似层状或透镜状产出。矿化严格地受地层层位和岩性控制,矿化主岩为块状硅质岩和条带状硅质岩。

(2) 矿体分带明显。矿体中部为块状硅质岩型铜矿石,其铜矿物为黄铜矿、斑铜矿和辉铜矿,黄铁矿是他形细粒黄铁矿;并出现石英脉型铜矿石。矿体南部、北部为条纹(带)状硅质岩型矿石,其铜矿物仅为黄铜矿,黄铁矿是立方体或五角十二面体黄铁矿,且粒度较粗,他形细粒黄铁矿含量极少;缺失石英脉型铜矿石。从矿体中部向南、北两侧铜品位由富变贫,趋势明显。

(3) 矿床地球化学特征表明,成矿作用与海底热水喷流沉积作用关系密切。块状硅质岩的 SiO_2 含量为 85.66% ~ 96.74%,条纹(带)状硅质岩的 SiO_2 含量为 74.83% ~ 87.52%,在 TiO_2 - Al_2O_3 和 $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ - Al_2O_3 及 $(\text{Co} + \text{Ni})$ -($\text{As} + \text{Cu} + \text{Mo} + \text{Pb} + \text{V} + \text{Zn}$) 关系图上,它们的投影点均落入与海底热水系统有关的硅质岩区或热水沉积岩区的硅质岩区。矿石稀土元素总量变化大,且显示轻稀土元素

富集,叠加的成矿作用引起轻稀土元素含量升高;具铈负异常、钕异常不明显的特点。矿石流体包裹体的均一温度为 121 ~ 257 ℃,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 6.2% ~ 8.3%,成矿流体属 K^+ - Ca^{2+} - SO_4^{2-} 型和 K^+ - Mg^{2+} - SO_4^{2-} 型。矿石的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -14.8 ‰ ~ +17.2 ‰,硅质岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 4.9 ‰,矿石的石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 12.4 ‰ ~ 16.3 ‰,与热泉型石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化基本一致(12.2 ‰ ~ 23.6 ‰)。矿石中黄铁矿内流体包裹体的 δD 值为 -116.2 ‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 -5.7 ‰,接近于美国黄石公园酸性热泉的 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值;含矿硅质岩的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 17.947 ~ 18.951, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 15.606 ~ 15.711, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为 36.466 ~ 38.496。 Pb/Pb 同位素年龄为 1562.56 Ma,与矿体赋存层位年龄基本一致。

综上所述,笔者认为,蓑衣坡硅质岩型铜矿床的成因类型属裂谷处于拉张裂隙阶段发生的海底热水喷流沉积作用形成的硅质岩型铜矿床。

致 谢 本文初稿完成后,得到了谭运金教授级高级工程师的审阅并提出了修改意见,在此表示衷心地感谢。

References

Ding T P. 1980. Hydrogen and oxygen isotope geochemistry[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).

- Gong L, He Y, Chen T Y. 1996. Proterozoic rift copper deposits in Dongchuan, Yunnan Province[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 73 ~ 150 (in Chinese).
- Han F, and Hutchinson R W. 1989. Evidence for exhalative origin for rocks and ores of the Dachang tin polymetallic field: the ore-bearing formation and hydrothermal exhalative sedimentary rocks [J]. Mineral Deposits, 8 (2): 25 ~ 40 (in Chinese with English abstract).
- Lin W D and Li Z Q. 1995. The thermal water sediments and it's siliceous rock-hosted copper deposit in Lanipen deposits[J]. South-western Geology for Mineral Resources, (1-2): 50 ~ 65 (in Chinese with English abstract).
- Pollock S C. 1987. Chert Formation in an Ordovician volcanic arc[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 157 (1): 75 ~ 84.
- Ran C Y. 1990. Ore-genetic mechanism of stratiform and strata-bound copper deposits in Xikang-Yunnan axis[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Tu G Z. 1988. Geochemistry of stratiform and strata-bound deposits in China[M]. Beijing: Science Press. 131 ~ 152. (in Chinese).
- Wang J B, Qin K Z, Wu Z L, et al. 1998. Volcanic-exhalative-sedimentary lead-zinc deposits in the southern margin of the Altai, Xinjiang [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 18 ~ 45 (in Chinese).
- Zheng M H, et al. 1994. The Stratabound gold deposits of exhalation type and turbidity type[M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science and Technology. 110 ~ 120 (in Chinese).
- Хотин М Ю. 1972. Кремнистые породы позднего лавной эффузивно-туфовой кремнистой формации по Юострова Камчатского мыса[J]. Литология и полезные ископаемые, (3): 97 ~ 111.

附中文参考文献

- 丁梯平, 1980. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 龚琳, 何毅, 陈天佑, 等. 1996. 云南东川元古宙裂谷型铜矿[M]. 北京: 冶金工业出版社. 73 ~ 150.
- 韩发, 哈钦森 R W. 1989. 大厂锡-多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩[J]. 矿床地质, 8(2): 25 ~ 40.
- 林文达, 李志群. 1995. 东川滥泥坪矿区的热水沉积岩及其硅质岩铜矿[J]. 西南矿产地质, (1-2): 50 ~ 65.
- 冉崇英. 1990. 康滇地轴层控铜矿床的成矿机理[M]. 北京: 地质出版社.
- 涂光炽. 1988. 中国层控矿床地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 131 ~ 152.
- 王京彬, 秦克章, 吴志亮, 等. 1998. 阿尔泰山南缘火山喷流沉积型铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社. 18 ~ 45.
- 郑明华. 1994. 喷流型与浊流型层控金矿床[M]. 成都: 四川科学技术出版社. 110 ~ 120.

Geological-geochemical characteristics and genesis of Suoyipo silicalite type copper deposit

LI Yi^{1,3}, LI Fu-ping^{2,3} and HE Guo-chao³

(1 Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2 China University of Geosciences, Beijing 10083, China;

3. Guilin Research Institute of Geology for Mineral Resources, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract

Hosted mainly in massive and banded siliceous rocks, the Suoyipo copper deposit is located in a Proterozoic rift. The SiO₂ contents of massive and banded siliceous rocks are 86.66% ~ 96.74% and 74.83% ~ 87.52%, respectively. In the TiO₂-Al₂O₃, (K₂O + Na₂O)-Al₂O₃ and (Co + Ni)-(As + Cu + Mo + Pb + V + Zn) diagram for siliceous rocks, the projection points of siliceous rocks in the Suoyipo copper deposit fall in the region related to the submarine hydrothermal system or hydrothermal sedimentary rock. ΣREE values of ores from the Suoyipo copper deposit vary remarkably and show enrichment of LREE and negative δCe anomalies. The homogeneous temperature and salinity of fluid inclusions in ores are in the range of 121° ~ 257°C and 6.2% ~ 8.3% [w(NaCl_{eq})], respectively. The ore-forming fluids are of K⁺-Ca²⁺-SO₄²⁻ and K⁺-Mg²⁺-SO₄²⁻ types. The δ³⁴S values of ores are -14.8‰ ~ +17.2‰, whereas δD and δ¹⁸O_{H₂O} values of fluid inclusions in pyrite of ores are -116.2‰ and -5.7‰, respectively. δ¹⁸O values of quartz in ores are 12.4‰ ~ 16.3‰ and fall in the region of thermal spring type quartz. ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb and ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb ratios of ore-bearing siliceous rocks are 17.947 ~ 18.951, 15.606 ~ 15.711 and 36.466 ~ 38.496, respectively. According to the geological-geochemical characteristics, it is considered that the Suoyipo copper deposit is an exhalation-type copper deposit.

Key words: geology, silicalite type copper deposit, geological-geochemical characteristics, Suoyipo