

文章编号:0258-7106(2005)03-0285-07

滇黔交界地区峨眉山玄武岩铜矿的 PGE 及微量元素特征*

李厚民^{1,2}, 毛景文^{1,3}, 王登红¹, 陈毓川⁴, 张长青³, 许虹³

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 长安大学, 陕西 西安 710054;

3 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 4 中国地质科学院, 北京 100037)

摘 要 为了进一步探讨玄武岩铜矿的成因, 文章对滇黔交界地区玄武岩铜矿的铜、铂族元素及其他微量元素的地球化学特征进行了研究。结果表明: 与铜矿化关系密切的有机质对铜的初始富集作用不明显, 铜矿化是后生热液成因的, 进一步支持了玄武岩为铜矿化的矿源岩、沥青及碳质等有机质的存在只是为自然铜沉淀提供了条件的认识。而且, 铜矿的低 U、Th 含量为该类铜矿的铅是正常铅提供了合理的解释。

关键词 地球化学; 铜含量; 铂族元素; 微量元素; 铜矿; 玄武岩

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

峨眉山玄武岩铜矿化广泛发育于玄武岩及其含碳沉积夹层中, 虽然目前仅少数达小型矿床规模, 但由于矿化线索普遍, 且近期在这类铜矿中发现了大量有机质, 因此重新引起了人们的关注。目前, 除对玄武岩铜矿的风险勘探正在进行外, 研究工作也正在展开, 李厚民等(2004a)、朱炳泉等(2002a; 2002b)、Zhu 等(2002a; 2002b)和王砚耕等(2003)对该类铜矿的基本特征进行了总结, 毛景文等(2003)、李厚民等(2004b; 2004c)对该类铜矿的稳定同位素地球化学和有机地球化学特征进行了研究。本文将对滇黔交界地区玄武岩铜矿及其脉石矿物中的铜、铂族元素及其他微量元素特征进行研究。

1 玄武岩铜矿基本特征

二叠纪峨眉山玄武岩组一般自下而上分为 4 个岩性段(云南省地质局, 1989), 滇黔交界地区的玄武岩铜矿主要产于第四岩性段($P_2\beta^4$)的下部, 容矿岩石为玄武岩流顶部的角砾状玄武岩、杏仁状玄武岩及含碳沉积岩夹层。铜矿化顺层发育, 具层控特征, 按容矿岩石可分为 2 类: ①产于玄武岩中的铜矿化: 主要矿石矿物为自然铜, 其次为黑铜矿、赤铜矿、孔雀石等铜的氧化物; 脉石矿物主要为沥青、石英等; ②

产于含碳沉积岩夹层中的铜矿化: 主要铜矿物为自然铜及黑铜矿、赤铜矿等铜的氧化物, 其次为少量辉铜矿, 脉石矿物以碳质、浊沸石、石英为主。本文将前者称为沥青铜矿, 将后者称为碳质铜矿。该区玄武岩铜矿的详细特征可参见李厚民等(2004a)。

2 样品特征、测试方法及测试结果

本次研究的样品采自滇黔交界地区茂林、铜厂、永胜得、苏家箐、大地、闹鹰岩、铜厂河、黑山坡等玄武岩型铜矿以及大关、毛坪等地的沥青灰岩(滇黔交界地区玄武岩铜矿床分布图请参见李厚民, 2004b)。

2.1 铜矿石及其中脉石矿物的铜含量

采用碘量法测试了铜矿石、铜矿石中主要脉石矿物及围岩的 Cu 含量(表 1)。结果表明, 沥青铜矿石 w_{Cu} 为 0.39%~12.14%, 平均 4.96%; 碳质铜矿石 w_{Cu} 为 0.53%~13.78%, 平均 7.70%。

由于有的沥青及碳质中有不易分离的自然铜等铜矿物微粒, 表 1 中沥青及碳质的 w_{Cu} 变化很大, 沥青为 0~18.242%, 碳质为 0~17.54%。

铜矿石中的其他主要脉石矿物沸石及方解石中 Cu 含量很低, 用碘量法不能检测出来。

沥青化玄武岩、绿帘石化玄武岩、碳质泥岩及含

* 本文得到中国地质调查局地质调查课题(编号:200310200002)和国家重点基础规划发展项目(编号 G1999043211)的联合资助
第一作者简介 李厚民, 男, 1962 年生, 博士, 主要从事矿床学研究。
收稿日期: 2004-10-21; 改回日期: 2005-01-17。李岩编辑。

表1 玄武岩铜矿石、围岩及脉石矿物中的铜含量

Table 1 Copper contents of basalt copper ores, gangue minerals and wall rocks

样品号	样品名称	典型矿物组合	采样地点	测定对象	w _{Cu} /%
Tch3	沥青铜矿石	沥青+黄铜矿	威宁铜厂河铜矿床	矿石	1.49
DD9	沥青铜矿石	沥青+自然铜+方解石	鲁甸大地铜矿点	矿石	0.39
XTC1	沥青铜矿石	自然铜+石英	茂林铜厂铜矿点	矿石	3.33
XTC20	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	茂林铜厂铜矿点	矿石	8.77
XTC21	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	茂林铜厂铜矿点	矿石	1.14
ML11	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	茂林铜矿点	矿石	6.97
ML24	沥青铜矿石	沥青+自然铜	茂林铜矿点	矿石	2.19
Zht4	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	昭通苏家箐铜矿点	矿石	2.59
SJQ6	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	昭通苏家箐铜矿点	矿石	12.14
ML31	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	茂林铜矿点	矿石	10.61
XTC22	沥青铜矿石	沥青+自然铜+石英	茂林铜厂铜矿点	矿石	1.23
Hst4	碳质铜矿石	碳质+自然铜+辉铜矿+沸石	威宁黑山坡铜矿点	矿石	9.88
Lyy11	碳质铜矿石	碳质+自然铜+辉铜矿+沸石	鲁甸闹鹰崖铜矿点	矿石	0.53
Lyy12	碳质铜矿石	碳质+自然铜+辉铜矿+沸石	鲁甸闹鹰崖铜矿点	矿石	3.99
Lyy16	碳质铜矿石	碳质+自然铜+辉铜矿+沸石	鲁甸闹鹰崖铜矿点	矿石	12.6
ML29-6	碳质铜矿石	碳质+自然铜+沸石	茂林铜矿点	矿石	5.44
Nyy3	炭质铜矿石	碳质+自然铜+辉铜矿+沸石	鲁甸闹鹰崖铜矿点	矿石	13.78
Ysd3	碳质铜矿石	碳质+自然铜+沸石	永胜得铜矿点	矿石	1.75
XTC27	宣威组含碳泥岩	少量黑铜矿	茂林铜厂铜矿点	矿化岩石	0.18
Ysd8	含自然铜炭质泥岩	少量自然铜	永胜得铜矿点	矿化岩石	0.22
Shuic1	含自然铜炭质泥岩	少量自然铜	水槽子铜矿点	矿化岩石	0.18
XTC9	沸石化含炭杂砂岩	沸石+碳质	铜厂铜矿点	矿化岩石	0.18
ML10	含铜块状沥青	沥青+自然铜	茂林铜矿点	含铜沥青	18.24
ML30	含铜块状沥青	沥青+自然铜	茂林铜矿点	含铜沥青	12.85
ML20	沥青铜矿石	沥青+自然铜	茂林铜矿点	含铜沥青	1.71
SJQ9	含铜沥青	沥青+自然铜	昭通苏家箐铜矿点	含铜沥青	7.02
ML19	沥青玄武岩	沥青	茂林铜矿点	沥青	0.04
ML4	沥青石英脉	沥青	茂林铜矿点	沥青	0.09
Zht3	块状沥青	沥青	昭通苏家箐铜矿点	沥青	0.00
Hst4	碳质铜矿石	碳质+自然铜	威宁黑山坡铜矿点	含铜碳质	17.54
Nyy9	碳质铜矿石	碳质+自然铜	鲁甸闹鹰崖铜矿点	含铜碳质	4.60
Lyy8	炭化木	碳质	鲁甸闹鹰崖铜矿点	碳质	0.00
Lyy14	炭化木	碳质	鲁甸闹鹰崖铜矿点	碳质	0.00
Dapj3	煤	煤	大井大坡脚煤矿	煤	0.04
Wzq3	煤	煤	小寨窝子箐煤矿	煤	0.00
Dapj2	煤	煤	大井大坡脚煤矿	煤	0.00
Lyy9	沸石	沸石	鲁甸闹鹰崖铜矿点	沸石	0.00
ML21	沸石	沸石	茂林铜矿点	沸石	0.00
Zht8	晶洞状沸石	沸石	昭通苏家箐铜矿点	沸石	0.00
Tch5	方解石团块	方解石	威宁铜厂河铜矿床	方解石	0.00
ML22	方解石	方解石	茂林铜矿点	方解石	0.00
Zht2	方解石	方解石	昭通苏家箐铜矿点	方解石	0.00
Daguan2	方解石	方解石	大关石灰窑灰岩	方解石	0.00
XTC23	沥青化玄武岩	沥青	茂林铜厂铜矿点	岩石	0.01
DD3	沥青化玄武岩	沥青	鲁甸大地铜矿点	岩石	0.00
ML14	绿帘石化玄武岩	绿帘石	茂林铜矿点	岩石	0.04
ML7	炭质泥岩	碳质	茂林铜矿点	岩石	0.00
Daguan5	方解石沥青灰岩	方解石+沥青	大关石灰窑灰岩	岩石	0.00
Maop4	沥青灰岩	沥青	毛坪蚂蟥沟灰岩	岩石	0.00

分析方法:碘量法;测试单位:长安大学水资源与环境工程系实验中心。

沥青灰岩的铜含量也很低,用碘量法几乎不能检测出来。

2.2 铜矿石的铂族元素含量及其特征

采用 ICP-MS 方法对铜矿石的铂族元素进行了测试,结果见表 2。由于 Os 对容器壁的渗透性及样品制备过程中可能有部分 Os 的丢失,因此该方法不能给出 Os 的分析数据。

从表 2 可见,沥青铜矿石的铂族元素含量(w_B ,下同)分别为 Ru $0.17 \times 10^{-9} \sim 1.25 \times 10^{-9}$, Rh $0.34 \times 10^{-9} \sim 5.14 \times 10^{-9}$, Pd $11.18 \times 10^{-9} \sim 62.84 \times 10^{-9}$, Ir $0.03 \times 10^{-9} \sim 0.29 \times 10^{-9}$, Pt $3.27 \times 10^{-9} \sim 11.07 \times 10^{-9}$;碳质铜矿石的铂族元素含量分别为 Ru $0.42 \times 10^{-9} \sim 0.81 \times 10^{-9}$, Rh $0.26 \times 10^{-9} \sim 1.67 \times 10^{-9}$, Pd $13.55 \times 10^{-9} \sim 245.10 \times 10^{-9}$, Ir $0.13 \times 10^{-9} \sim 0.27 \times 10^{-9}$, Pt $5.25 \times 10^{-9} \sim 44.26 \times 10^{-9}$;沥青化玄武岩的铂族元素含量分别为 Ru $0.15 \times 10^{-9} \sim 0.19 \times 10^{-9}$, Rh $0.16 \times 10^{-9} \sim 0.45 \times 10^{-9}$, Pd $4.48 \times 10^{-9} \sim 12.25 \times 10^{-9}$, Ir $0.08 \times 10^{-9} \sim 0.10 \times 10^{-9}$, Pt $5.44 \times 10^{-9} \sim 7.22 \times 10^{-9}$ 。可见沥青铜矿石和碳质铜矿石的铂族元素含量类似,而沥青化玄武岩的铂族元素含量略低于铜矿石。除 Lyy12 外,其他铜矿石和 ML19 沥青玄武岩与未蚀变矿化的峨眉山玄武岩相比, Rh、Pd 富集,而 Ru、Ir、Pt 贫化。Lyy12 铜矿石与未蚀变玄武岩相比, Rh、Pt、Pd 富集,其中 Pd 含量达 245.10×10^{-9} , PGE 总量达 292.11×10^{-9} ,表明铜矿石中铂族元素含量可

达到矿化程度。XTC23 沥青玄武岩与未蚀变玄武岩相比,5 个铂族元素均贫化。

铜矿石中铂族元素以熔点较低的 Pt、Pd 含量最高,相对配分模式为 Pt-Pd 型;铂族元素 w_B 变化顺序为 Pd > Pt > Rh > Ru > Ir; Pd 比 Pt 含量高, Pd/Pt 比值为 0.82 ~ 6.86, 平均 3.66; Pd/Ir 比值为 27.66 ~ 163.93, 平均 69.24; (Pd + Pt)/(Ru + Rh + Ir) 比值为 9.42 ~ 105.11, 平均 33.11。与球粒陨石相比,铜矿石及玄武岩的铂族元素均贫化。

2.3 铜矿石的微量元素含量及其特征

采用 ICP-MS 方法对铜矿石的微量元素进行了测试,结果见表 3。

沥青铜矿石与碳质铜矿石相比,前者的大离子亲石元素含量低于后者,而过渡元素含量高于后者,如沥青铜矿石的 Rb、Cs、Sr、Ba、Cr、Co、Ni 含量($w_B/10^{-6}$)分别为 0.28 ~ 3.9, 0.009 ~ 0.07, 18.9 ~ 52.2, 5.4 ~ 66.2, 16.9 ~ 40.4, 16.2 ~ 41.8, 19.3 ~ 54.9; 碳质铜矿石的 Rb、Cs、Sr、Ba、Cr、Co、Ni 含量($w_B/10^{-6}$)分别为 1.8 ~ 9.9, 0.12 ~ 0.93, 93.3 ~ 370, 34.3 ~ 523, 10.1 ~ 32.3, 1.4 ~ 10.6, 3.4 ~ 19.9。这可能显示了铜矿石中微量元素对原岩的成分继承性。

与未蚀变玄武岩的微量元素(肖龙等, 2003)相比,表 3 所列铜矿石的微量元素普遍亏损,但由于原岩的不同,不同类型铜矿石中不同元素的亏损程度不同,以玄武岩为主岩的铜矿石 Rb、Sr、Ba 等大离子

表 2 玄武岩铜矿石的铂族元素含量

Table 2 PGE contents of basalt copper ores

样号	样品名称	$w_B/10^{-9}$				
		Ru	Rh	Pd	Ir	Pt
DD9	沥青铜矿石	0.17	0.34	11.18	0.03	3.27
XTC20	沥青铜矿石	0.64	1.12	30.48	0.14	8.07
XTC21	沥青铜矿石	0.60	0.59	16.00	0.28	11.07
ML10	沥青铜矿石	0.54	0.76	20.82	0.08	5.04
ML24	沥青铜矿石	0.55	0.50	62.84	0.13	9.37
SJQ6	沥青铜矿石	1.25	5.14	54.85	0.29	7.99
Lyy12	碳质铜矿石	0.81	1.67	245.10	0.27	44.26
Lyy16	碳质铜矿石	0.42	0.47	28.44	0.13	8.62
Ysd3	碳质铜矿石	0.74	0.26	13.55	0.16	5.25
XTC23	沥青玄武岩	0.15	0.16	4.48	0.10	5.44
ML19	沥青玄武岩	0.19	0.45	12.25	0.08	7.22
	水城峨眉山玄武岩平均值	1.71	0.34	7.73	1.16	10.80
	CI 球粒陨石	712	134	560	481	990

测试方法: ICP-MS; 测试仪器: 美国 TJA 公司生产 PQEXCELL; 测试单位: 中国地质科学院岩矿测试中心。水城峨眉山玄武岩平均值据李晓敏等(2003a; 2003b), CI 球粒陨石据 Anders 等(1989)。

表3 峨眉山玄武岩铜矿石的微量元素含量
Table 3 Trace element contents of basalt copper ores

样号	$w_B/10^{-9}$														
	Be	Rb	Cs	Sr	Ba	Th	U	Ga	Sc	Cr	Co	Ni	Pb	Bi	Mo
DD9	0.5	0.7	0.03	33.0	26.2	3.4	0.4	12.7	10.6	19.0	22.7	31.7	5.4	0.06	1.6
XTC20	0.4	0.3	0.01	52.2	17.7	4.1	0.4	16.9	15.8	24.4	18.9	24.8	7.2	0.03	1.0
XTC21	1.4	0.4	0.02	43.9	26.3	5.6	1.0	28.5	23.1	35.5	41.5	51.6	8.1	0.02	2.2
ML10	0.3	0.3	0.03	18.9	5.4	2.2	0.3	16.9	10.1	16.9	16.2	19.3	4.7	0.49	1.2
ML24	1.7	3.9	0.02	49.9	66.2	6.9	1.2	30.4	25.4	40.4	41.8	54.9	7.9	0.08	8.6
SJQ6	0.6	0.8	0.07	29.6	20.7	5.0	1.6	27.8	12.1	21.4	32.3	36.4	7.5	0.09	1.8
Lyy12	0.9	9.9	0.37	179.0	523.0	4.6	2.4	12.4	12.3	23.2	8.6	14.7	5.6	1.40	1.6
Lyy16	0.3	1.8	0.12	93.3	34.3	2.0	0.4	3.9	3.6	10.1	1.4	3.4	4.7	1.60	1.4
Ysd3	2.9	3.8	0.93	370.0	61.6	20.4	1.9	33.5	16.0	32.3	10.6	19.9	8.8	0.16	0.5
XTC23	1.8	1.1	0.26	55.5	30.9	9.4	0.8	36.8	24.3	32.2	46.5	57.3	9.8	0.06	3.4
ML19	1.8	3.6	0.35	81.1	223.0	5.4	0.3	17.1	25.0	43.3	18.5	25.9	8.8	0.03	1.0
玄武岩		28.9	4.35	414.1	395.6	6.9	1.7	27.3	35.2	91.2	48.8	73.8			
原始地幔	60	0.55	0.018	17.8	5.1	0.064	0.018	3	13	3000	100	2000	0.12	0.01	0.059

测试方法:ICP-MS;测试仪器:美国TJA公司生产PQEXCELL;测试单位:中国地质科学院岩矿测试中心。玄武岩为平均值,来自肖龙等(2003);原始地幔据Taylor等(1985)。

亲石元素亏损明显,而过渡元素Sc、Cr、Co、Ni亏损较弱;而以含碳沉积岩为主岩的铜矿石(Lyy12、Lyy16、Ysd3)中各微量元素贫化程度类似,曲线平缓。

铜矿石中Th、U含量低, $w_{Th} 2 \times 10^{-6} \sim 20.4 \times 10^{-6}$,平均 6.27×10^{-6} ; $w_U 0.29 \times 10^{-6} \sim 2.4 \times 10^{-6}$,平均 0.97×10^{-6} ,这与各矿物中铅同位素组成主要为正常铅(李厚民等,2004b)的事实吻合。

3 讨论

3.1 铜矿石及矿物铜含量提供的成因信息

虽然玄武岩铜矿中有机质发育,但在野外露头和矿石光片中见自然铜等铜矿物呈交代炭化木及充填沥青的裂隙产出,表明它们晚于沥青及炭化木。那么,初始的有机质中有没有铜的明显富集呢?矿石、矿物、碳质岩石及沥青化玄武岩的铜分析给出了答案。从前面的介绍可以看出:矿石的铜品位变化大,沥青、碳质的铜含量可以很低甚至检测不出来,沥青化玄武岩及碳质泥岩的铜含量也很低甚至检测不到。这些特征表明:原始沉积的碳质、炭化木的前身植物、沥青的前身有机质流体(古石油)中没有可检测含量的铜的富集。明显的铜矿化是后来充填和交代的。有机质只是为自然铜的沉淀提供了有利条件。因此,有的沥青及碳质中有自然铜等沉淀,其铜含量高;而没有铜矿化的沥青和碳质及沥青化玄武岩、碳质泥岩的铜含量很低。

3.2 铜矿石铂族元素特征的成因意义

铜矿石中铂族元素的相对配分模式为Pt-Pd型,以熔点较低的Pt、Pd占优势,未蚀变的峨眉山玄武岩的相对配分模式也为Pt-Pd型(李晓敏等,2003a;2003b;张成江等,1998);与球粒陨石类比,铜矿石及未蚀变玄武岩的铂族元素均贫化,且铜矿石的PGE配分模式与玄武岩的类似(图1),均为左倾的曲线(Pt、Pd富集型)。这些均显示了玄武岩铜矿石与玄武岩的密切成因联系。

但是,铜矿石与未蚀变玄武岩的铂族元素特征又有明显差异。表现在:①铜矿石铂族元素含量(w_B)变化顺序为Pd>Pt>Rh>Ru>Ir,Pd/Pt比值为0.82~6.86;而黔西水城、威宁峨眉山玄武岩PGE的含量变化顺序为Pt>Pd>Ru>Ir>Rh,Pd/Pt比值为0.14~2.29,平均0.78(李晓敏等,2003a;2003b),清音电站剖面峨眉山玄武岩PGE的含量变化顺序为Pt>Pd>Ru>Os>Rh>Ir(张成江等,1998),差异明显。②铜矿石中Pd/Ir比值(27.66~163.93)明显高于水城—威宁一带峨眉山玄武岩(Pd/Ir比值为2.01~32.16,平均9.14,李晓敏等,2003a;2003b);③铜矿石的(Pd+Pt)/(Ru+Rh+Ir)比值(9.42~105.11)也明显高于水城—威宁一带的峨眉山玄武岩[(Pd+Pt)/(Ru+Rh+Ir)比值为1.926~6.575,平均4.092,李晓敏等,2003a;2003b];④铜矿石铂族元素的球粒陨石配分曲线斜率比玄武岩的陡,且Rh异常较明显,而玄武岩的曲线较平坦,无Rh异常(图1)。

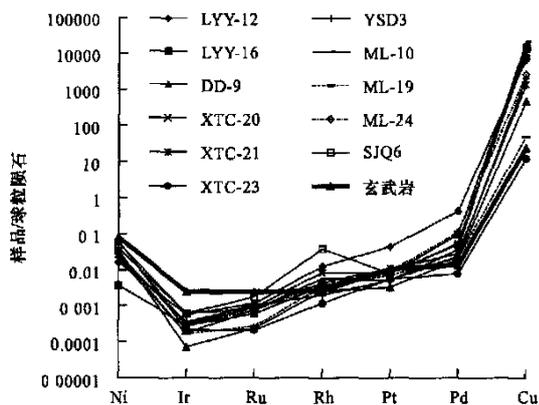


图 1 玄武岩铜矿石中铂族元素球粒陨石标准化图
Fig.1 Chondrite-normalized patterns of PGE in basalt copper ores

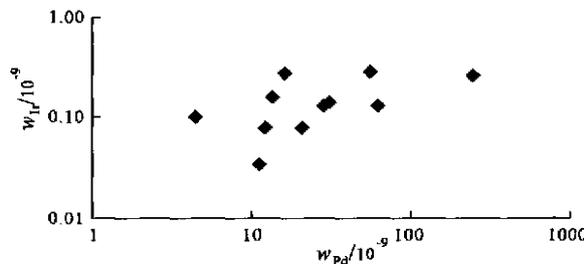


图 2 玄武岩铜矿石 Ir-Pd 关系图
Fig.2 The relation between Ir and Pd in basalt copper ore

Keays 等(1982)研究发现岩浆成因的矿床中 Ir 与 Pd 的含量具有明显的正相关关系,而热液交代及火山喷气成因的矿床中 Ir 与 Pd 无此关系。从图 2 可见,研究区玄武岩铜矿石的 Ir 与 Pd 含量无相关关系,表明其不是岩浆成因的,与典型岩浆成因的金川铜镍硫化物矿石(汤中立等,1987)、布什维尔德 MR 层矿石(Barnes et al., 1985)及安大略科马提岩中的浸染状矿石(Barnes et al., 1987)的 Pd < Pt 明显不同。Keays 等(1982)的研究还表明,火山喷气成因矿床中 Ir 与 Pd 的含量均很低,而本区玄武岩铜矿石中 Pd 含量是铂族元素中最高的,表明其是热液成因的。根据赫尔伯特等(1991)对世界有关热液铂族元素矿床的研究,认为热液铂族元素矿床的一个明显特征是 Pd 的含量经常比 Pt 高,并认为这是由于 Pd 比 Pt 化学活动性强,更容易形成水溶络合物之故。本区铜矿化的铂族元素具热液成因特征,这与其晚于沥青等有机质的地质产状吻合。

前人研究认为 Pd/Ir 比值可以反映岩浆熔融程度,该比值越大反映熔融程度越小(Barnes et al.,

1985),这可能与熔点较低的 Pd、Pt 在熔体相中的分配系数比熔点较高的 Rh、Ru、Ir 的分配系数较大有关。Keays 等(1982)研究认为 Ir 难以在水溶液中迁移,而熔点较低的 Pd 等较易迁移,因此容易在热液成因的玄武岩铜矿石中富集。

研究区玄武岩铜矿石中铂族元素总含量与铜含量有正相关的趋势(图 3),也表明铂族元素与铜类似,均为热液成因。

3.3 铜矿石微量元素特征的成因意义

在原始地幔标准化图(图 4)上,铜矿石与未蚀变玄武岩的曲线型式类似,均富集大离子亲石元素 Rb、Sr、Ba 等,而亏损过渡族元素 Cr、Co、Ni 等,可能显示铜矿化与玄武岩有成因联系。

Keays 等(1982)研究发现岩浆成因的矿床中 Ir 与 Ni、Pd 与 Ni 的含量具有明显的正相关关系,而热液交代及火山喷气成因的矿床无此关系。本研究区玄武岩铜矿石的 Ir 与 Ni、Pd 与 Ni 均无明显的正相关关系(图 5),表明其不是岩浆成因的。因此,微量元素和铂族元素特征也表明本区玄武岩铜矿是热液成因的。

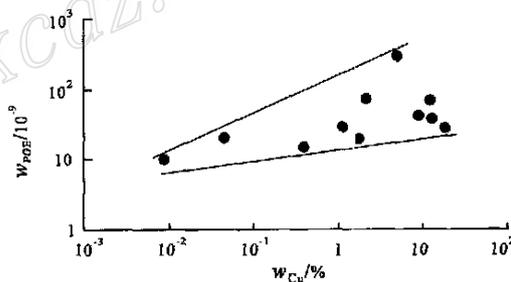


图 3 玄武岩铜矿石中 PGE-Cu 关系图
Fig.3 PGE-Cu diagram of basalt copper ores

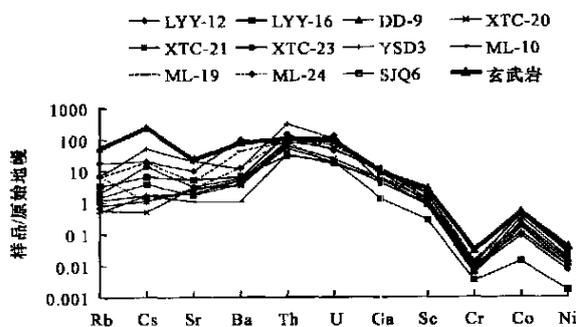


图 4 玄武岩铜矿石中微量元素的原始地幔标准化图
Fig.4 Primitive mantle-normalized patterns of trace elements in basalt copper ores

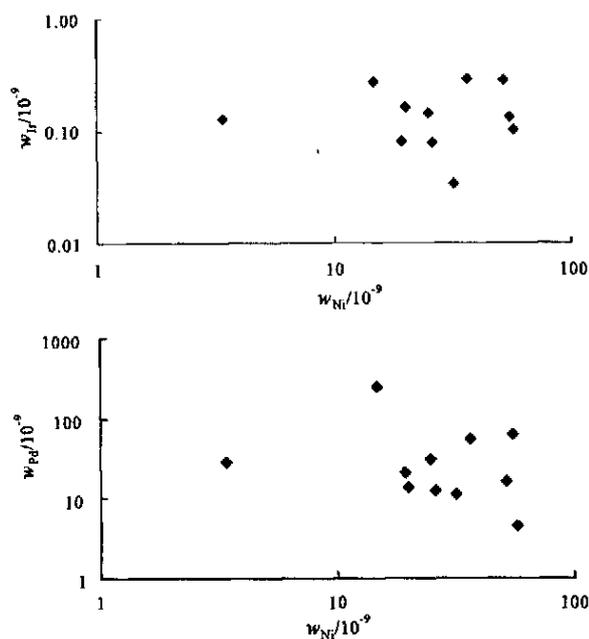


图 5 玄武岩铜矿石 Ir-Ni 和 Pd-Ni 关系图
Fig.5 Ir-Ni and Pd-Ni diagrams of basalt copper ore

本区玄武岩铜矿石中大量发育沥青及碳质等有机质。一般而言,富含有机质的物质具有异常的铅同位素组成。但是,本区玄武岩铜矿石为正常铅(李厚民等,2004b)。该类铜矿石的 Th、U 含量低可能是其铅为正常铅的原因。

综上所述,研究区铜矿石的铂族元素和微量元素特征既表明其为后生热液成因,又与玄武岩有一定的成因联系。笔者认为,这种成因联系可能体现在玄武岩提供了成矿物质,是铜和铂族元素矿化的矿源岩。

4 结 论

(1) 玄武岩铜矿石及其主要脉石矿物中的铜含量特征表明铜矿化主要为后生热液成因,沥青及碳质等有机质的存在为自然铜沉淀提供了有利条件,但原始有机质中铜的初始富集不明显。

(2) 铜矿石的铂族元素和微量元素特征进一步证明,虽然铜矿与玄武岩有密切的成因联系,但铜矿化主要不是玄武岩岩浆或火山喷气成因的,而是后生热液活动的产物。

(3) 富含有机质的玄武岩铜矿石中 U、Th 含量低,为该类铜矿石的正常铅特征提供了合理解释。

References

Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements:

Meteoritic and solar[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53(1): 197 ~ 214.

Barnes S J, Naldertt A J and Gorton M P. 1985. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chem. Geol.*, 53(3/4): 303 ~ 323.

Barnes S J and Naldertt A J. 1987. Fractionation of platinum-group elements and gold in some Komatiites of the Abitibi greenstone belt, Northern Ontario[J]. *Econ. Geol.*, 82(1): 165 ~ 183.

Helbert L J. 1991. Interpreted by Shen C H and Liu D R. The Geological Settings of PGE[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).

Keays R R, Nickel E H, Groves D I, et al. 1982. Iridium and Palladium as discriminants of volcanic-exhalative hydrothermal and magmatic nickel sulfide mineralization[J]. *Econ. Geol.*, 77: 1535 ~ 1547.

Li H M, Mao J W, Xu Z B, et al. 2004a. Characteristics of copper mineralization distributed in huge Emeishan basalt district of northeast Yunnan Province and west Guizhou Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(5): 495 ~ 502 (in Chinese with English abstract).

Li H M, Mao J W, Zhang C Q, et al. 2004b. Isotopic geochemistry of Emeishan basalt copper deposits in northeastern Yunnan and western Guizhou[J]. *Mineral Deposits*, 23(2): 232 ~ 240 (in Chinese with English abstract).

Li H M, Mao J W, Zhang C Q, et al. 2004c. The composition, texture and origin of organic matter in basalt-type copper deposits in the northeastern Yunnan-western Guizhou area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 519 ~ 526 (in Chinese with English abstract).

Li X M, Hao L B, Gan S C, et al. 2003a. The analysis on the PGE anomaly and its prospecting forecasting in the Emeishan basalts[J]. *J. Mineral. Petrol.*, 23(3): 21 ~ 25 (in Chinese with English abstract).

Li X M, Hao L B, Gan S C, et al. 2003b. Geochemical characteristics of the platinum-group elements in Emeishan basalts, western Guizhou[J]. *Geol. Geochem.*, 31(4): 29 ~ 34 (in Chinese with English abstract).

Mao J W, Wang Z L, Li H M, et al. 2003. Carbon and oxygen isotope components in the Permian basalt-hosted copper deposit in Ludian area, Yunnan: Implication for the mineralization process[J]. *Geol. Rev.*, 49(6): 610 ~ 615 (in Chinese with English abstract).

Tang Z L, Yang H Q, Su L, et al. 1987. Discussion on the character and source of the ore-forming magma of Jinchuan copper-nickel sulfide deposit[J]. *Acta Geologica of Gansu*, 6(1): 44 ~ 51 (in Chinese).

Taylor S R and McClelland S. 1985. The continental crust: composition and evolution[M]. Blackwell Scientific Publications.

Wang Y G and Wang S Y. 2003. Emeishan large igneous provinces and basalt copper deposits: An example from Permian basalt areas in Guizhou[J]. *Guizhou Geol.*, 20(1): 4 ~ 10 (in Chinese with English abstract).

Xiao L, Xu Y G, Mei H J, et al. 2003. Geochemistry of Emeishan flood basalts at Binchuan area, SW China: Rock types and temporal evolution[J]. *Chinese J. Geol.*, 38(4): 478 ~ 494 (in Chinese with

English abstract) .

Yunnan Geological and Mineral Resource Bureau . 1989 . Encyclopedia of the geology of Yunnan Province[M] . Beijing : Geol . Pub . House (in Chinese with English summary) .

Zhang C J and Li X L . 1998 . Geochemical characteristics of platinum group elements in Emeishan basalts[J] . Acta Petrologica Sinica , 14 (3) : 299 ~ 304 (in Chinese with English abstract) .

Zhu B Q , Chang X Y , Hu Y G , et al . 2002a . Discovery of Yanhe copper deposit in the Yunnan- Guizhou border area and a new train of thought for copper prospecting in the large igneous province of Emeishan flood basalts[J] . Advance in Earth Sciences , 17(6) : 912 ~ 917 (in Chinese with English abstract) .

Zhu B Q , Hu Y G , Zhang Z W , et al . 2002b . Discovery of the copper deposits with features of the Keweenaw type in the border area of Yunnan and Guizhou Provinces[J] . Sci . in China(Series D) , 46 (Supp .) : 60 ~ 72 .

附中文参考文献

赫尔伯特 L J . 1991 . 沈承珩 , 刘道荣 , 译 . 铂族元素的地质环境 [M] . 北京 : 地质出版社 . 101 ~ 139 .

李厚民 , 毛景文 , 徐章宝 , 等 . 2004a . 滇黔交界地区峨眉山玄武岩大火成岩区铜矿化蚀变特征[J] . 地球学报 , 25(5) : 495 ~ 502 .

李厚民 , 毛景文 , 张长青 , 等 . 2004b . 滇黔交界地区玄武岩铜矿同位素地球化学特征[J] . 矿床地质 , 23(2) : 232 ~ 240 .

李厚民 , 毛景文 , 张长青 , 等 . 2004c . 滇黔交界地区玄武岩铜矿有机质的组成、结构及成因[J] . 地质学报 , 78(4) : 519 ~ 526 .

李晓敏 , 郝立波 , 甘树才 , 等 . 2003a . 峨眉山玄武岩分布区内铂族元素异常分析及其找矿远景预测[J] . 矿物岩石 , 23(3) : 21 ~ 25 .

李晓敏 , 郝立波 , 甘树才 , 等 . 2003b . 黔西地区峨眉山玄武岩(东岩区) 铂族元素地球化学特征[J] . 地质地球化学 , 31(4) : 29 ~ 34 .

毛景文 , 王志良 , 李厚民 , 等 . 2003 . 云南鲁甸地区二叠纪玄武岩中铜矿床的碳氧同位素对成矿过程的指示[J] . 地质论评 , 49(6) : 610 ~ 615 .

汤中立 , 杨合群 , 苏犁 , 等 . 1987 . 金川硫化铜镍矿床成矿岩浆性质和源区特征讨论[J] . 甘肃地质学报 , 6(1) : 44 ~ 51 .

王砚耕 , 王尚彦 . 2003 . 峨眉山大火成岩省与玄武岩铜矿——以贵州二叠纪玄武岩分布区为例[J] . 贵州地质 , 20(1) : 4 ~ 10 .

肖龙 , 徐义刚 , 梅厚钧 , 等 . 2003 . 云南宾川地区峨眉山玄武岩地球化学特征 : 岩石类型及随时间演化规律[J] . 地质科学 , 38 (4) : 478 ~ 494 .

云南省地质局 . 1989 . 云南省地质志[M] . 北京 : 地质出版社 .

张成江 , 李晓林 . 1998 . 峨眉山玄武岩的铂族元素地球化学特征[J] . 岩石学报 , 14(3) : 299 ~ 304 .

朱炳泉 , 常向阳 , 胡耀国 , 等 . 2002a . 滇-黔边境鲁甸沿河铜矿床的发现与峨眉山大火成岩省找矿新思路[J] . 地球科学进展 , 17 (6) : 912 ~ 917 .

朱炳泉 , 胡耀国 , 张正伟 , 等 . 2002b . 滇黔地球化学边界似基韦诺 (Keweenaw) 型铜矿床的发现[J] . 中国科学(D 辑) , 32(增刊) : 153 ~ 162 .

PGE and trace element characteristics of copper mineralization in Emeishan basalts of Yunnan- Guizhou border area

LI Hou-min^{1,2} , MAO Jing-wen^{1,3} , WANG Deng-hong¹ , CHEN Yu-chuan⁴ ,
ZHANG Chang-qing³ and XU Hong³

(1 Institute of Mineral Resources , CAGS , Beijing 100037 , China ; 2 Chang'an University , Xi'an 710054 , Shaanxi , China ;

3 Faculty of Earth Sciences and Mineral Resources , China University of Geosciences , Beijing 100083 , China ;

4 Chinese Academy of Geological Sciences , Beijing 100037 , China)

Abstract

In order to understand the genesis of the copper mineralization in the Emeishan basalts , the authors studied characteristics of Cu , PGE and other trace elements in copper ores from the basalts in the Yunnan- Guizhou border area . Some conclusions have been drawn : ① There is no obvious enrichment of Cu in the original organic matter and the copper mineralization is mainly epigenetic , which further supports the conclusion that the basalt provided Cu for copper mineralization and the organic matter provided the reductive condition for the precipitation of native copper . ② The low Th and U content of the copper ores suggests that the Pb isotopic compositions of this type of ores are normal lead instead of radiogenic lead .

Key words : geochemistry , Cu content , PGE , trace elements , copper deposits , basalt