

中条山铜矿流体碳、氧同位素示踪

真允庆¹, 束乾安²

(1. 中国冶金地质勘查总局三局, 太原 030002; 2. 江苏省有色金属华东地质勘查局 814 队, 镇江 212005)

摘要:中条山铜矿富集区, 主要有铜矿峪斑岩型铜矿床和胡篦型、落家河型、横岭关型海底喷流沉积变质型铜矿床。四个铜矿床深部流体包裹体的碳、氧同位素分析样品, 无一例外地均落在有关图解上的“地幔多相体系—花岗岩区”与“海相碳酸岩区”之间, 表明它们属于低温蚀变作用成矿的一套热液矿床组合。矿石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-3.3\text{‰} \sim -8.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值为 $10.1\text{‰} \sim 19.83\text{‰}$, 包裹体的 $\text{K}/\text{Na} < 1$, 富含铜, 这些资料显示中条铜矿富集区是深部流体(地幔流体和岩浆流体等)、大气降水和地壳物质组成的极其复杂的成矿系统。

关键词:深部流体; 碳、氧同位素组成; 包裹体; 铜矿床; 中条山

中图分类号: P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2006)01-0030-08

中条山是我国重要的铜矿基地之一, 经过五十多年的勘查, 已经确认有铜矿峪斑岩型铜矿床、胡篦型铜矿床、落家河型铜矿床和横岭关型铜矿床。关于这些矿床的成因类型, 本文第一作者在“八五”期间参与“全国铜矿找矿攻关”科研项目时, 曾提出前者为古斑岩型铜矿床, 后三者为典型的变质海底喷流型铜矿床(SEDEX), 亦即与深部流体有关的变质热水沉积型铜矿床(HYSED)^[1-3]。所谓深部流体, 主要包括地幔流体、板块俯冲过程中岩石脱水产生的流体、深变质过程中由脱水作用(dehydration)形成的流体、以及与地幔物质上涌有关的岩浆水^[4]。深部流体通常被视为地幔来源的流体, 也称地幔流体(与铜矿成因关系密切)。本文试图从中条山铜矿床的流体包裹体地球化学特征入手, 由其碳、氧同位素的组成探讨其深部流体的示踪意义, 以有助于新一轮的铜矿普查和寻找。

1 区域地质背景与铜矿床地质特征概况

尽管对中条铜矿床的成因至今仍存在不同观点, 但对铜矿床在空间上均与不同期次、不同岩性的岩浆岩有着成生联系的现象已取得了共识。譬如铜矿峪斑岩铜矿床(4、5号矿体)认为

与变花岗闪长斑岩、石英斑岩有关; 落家河型铜矿床与细碧岩、变石英闪长岩有关; 胡篦型铜矿床与基性火山岩(席)、石英钠长岩和喷流岩紧密共生; 横岭关型铜矿床与变斜长角闪岩(床)有关。前者为超大型铜矿床, 后三者矿床规模已达中-小型。铜矿床主要呈层状、似层状产出, 矿石构造早期以细脉浸染状为主, 晚期多为团块状矿脉穿入其中。全区矿石矿物较为单一, 主要由黄铁矿、黄铜矿组成, 铜矿石中常伴生有 Au、Co 等有益组分。

2 包裹体地球化学特征

2.1 共性和特性

中条铜矿床的容矿主岩和矿石中的包裹体形态多种多样, 镜下见有椭圆形、三角形、长方形及不规则形, 但形态较规则的包裹体占多数, 常呈线状、星点状、面状和杂乱状分布。主要为原生包裹体, 次生包裹体仅在落家河矿区见到。包裹体特征见表 1。

按包裹体的相态不同可分为: a. 液相包裹体; b. 气相包裹体; c. 含液相 CO_2 包裹体; d. 含子矿物 NaCl 包裹体; e. 含液相包裹体几种。总体来说全区是以液相包裹体为主, 气相包裹体亦很普遍, 含子矿物包裹体常见, 气相包裹体仅见于铜矿峪。

收稿日期: 2005-07-13

基金项目: “全国铜矿找矿攻关”科研项目部分成果

作者简介: 真允庆(1932-), 男, 教授级高级工程师, 矿床学专业。

万方数据

表 1 中条裂谷主要铜矿床的包裹体特征

Table 1 Characteristics of inclusion in copper ore deposit from the Zhongtiao rift zone

矿区	样号	矿(岩)石类型	测定矿物	包裹体大小(μm)	包裹体类型 ^②	气相比(%)	均一温度($^{\circ}\text{C}$)	平均($^{\circ}\text{C}$)
胡篚型铜矿 ^①	Tm-2	电气石岩	石英	3×5 ~ 7×11	a,e,d	20 ~ 40	210 ~ 420	273
	KL201,Km23	石英钠长岩	石英	4×6 ~ 7×10	a,e,d	30 ~ 80	241 ~ 245	243
	Kb-12,Co2	蚀变方柱石黑云片岩中矿化脉	石英	4×9 ~ 9×11	a,e,d	20 ~ 40	180 ~ 456	281
	Kn13,d22	石英钠长岩中矿化脉	石英	7×7 ~ 7×20	a,e,d	10 ~ 40	162 ~ 410	324
	Kn13,C18	黑色片岩中矿化脉	石英	7×15 ~ 15×18	a,e,d	10 ~ 70	195 ~ 294	258
铜矿峪铜矿	Kt 517	变石英晶质凝灰岩	石英	7×7 ~ 22×5	a,b	5 ~ 20	179 ~ 187	183
	T 2-2	电气石岩	石英	5.5×11 ~ 7×9	a,e	20 ~ 30	231 ~ 613	258
	T 2-2	电气石岩	石英	9×11	e	80	291	291
	T 308	石英方解石硫化物矿脉	石英	7×11 ~ 22×22	a,e	12 ~ 25	149 ~ 361	238
落家河铜矿	L640-6	绿泥片岩	石英	20×10 ~ 50×25	a(d)	20 ~ 50	150 ~ 196	177
	Lp6	绿泥片岩含矿石英脉	石英	12×6 ~ 40×5	a(d)	10 ~ 20	385 ~ 357	362
							233 ~ 144	183
	Lp5	绿泥片岩不含矿石英脉	石英	24×22 ~ 12×12	a,d	5	387 ~ 301	338
							250 ~ 149	188
	Ly24	绿泥片岩不含矿石英脉	石英	30×7 ~ 10×6	a,d	5	285 ~ 248	266
							244 ~ 144	179
	Ly134	绿泥片岩含铜石英脉	石英	45×15 ~ 15×4	a,d	5	312 ~ 247	278
							170 ~ 150	156
	Ly273	绿泥片岩含铜石英脉	石英	40×20 ~ 5×4	a,d	5	540 ~ 424	466
							225 ~ 170	195
Ly349	绿泥片岩含铜方解石脉	方解石	20×20 ~ 7×4	a	10 ~ 15	260 ~ 118	209	
Ly349	绿泥片岩含铜方解石脉	方解石	20×20 ~ 7×4	a,d	>50			
L600-1	绿泥片岩石英方解石脉	方解石	20×20 ~ 7×4	a	20 ~ 50	155 ~ 129	137	
Ly72	绿泥片岩不含矿	方解石	24×7 ~ 8×6	a	5	260 ~ 157	227	
横岭关铜矿 ^③	H1-13	石英脉	石英	10 ~ 20	a(e)	5	212 ~ 160	180
	H1-21	含铜石英脉	石英	13 ~ 17	a	5	235 ~ 168	210
	H1-15	含铜石英脉	石英	20 ~ 40	a,d,e	5 ~ 10	238 ~ 176	209
	H1-19	含铜石英脉	石英	20 ~ 40	a,d,e	5 ~ 10	284 ~ 200	237
	H-19	含铜石英脉	石英	10 ~ 20	a,e	5 ~ 10	234 ~ 178	209
	H-16	含铜石英脉	石英	12 ~ 30	a,e	5	270 ~ 162	219
	H-3	含铜石英脉	石英	12 ~ 16	a,e	5 ~ 10	255 ~ 155	210
	H-17	含铜石英脉	石英	30 ~ 40	a,d	30 ~ 40	308 ~ 156	212

注:①胡篚型铜矿的包裹体系由中国地质科学院矿床地质研究所包裹体组测定,其他三个矿床的包裹体系由中国有色金属总公司桂林地质矿产研究院同位素室测定;②包裹体类型:a.液相包裹体,b.气相包裹体,c.含液相CO₂包裹体,d.含矿物包裹体,e.含气液包裹体;③据李树屏等科研报告(内部资料),1993

包裹体的大小和数量存在较大差异(表 1),以落家河铜矿包裹体的数量最多,极为普遍,其它矿床次之。包裹体的大小亦各不相同:横岭关铜矿的包裹体最大,直径在 $10 \sim 40 \mu\text{m}$ 之间;落家河铜矿床次之,其大小在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围之内;铜矿峪铜矿床是在 $5 \sim 22 \mu\text{m}$ 之间;而胡篔型铜矿床包裹体的数量最少,粒度最小,多数在 $3 \sim 15 \mu\text{m}$ 不等;这些反映成矿流体活动的强度和广度存在着差异。

四个铜矿床的均一温度并不相同,但在中低温是一致的,略呈正态分布,频率峰值为 $150 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,而高温并不一致或基本不一致(图 1)。

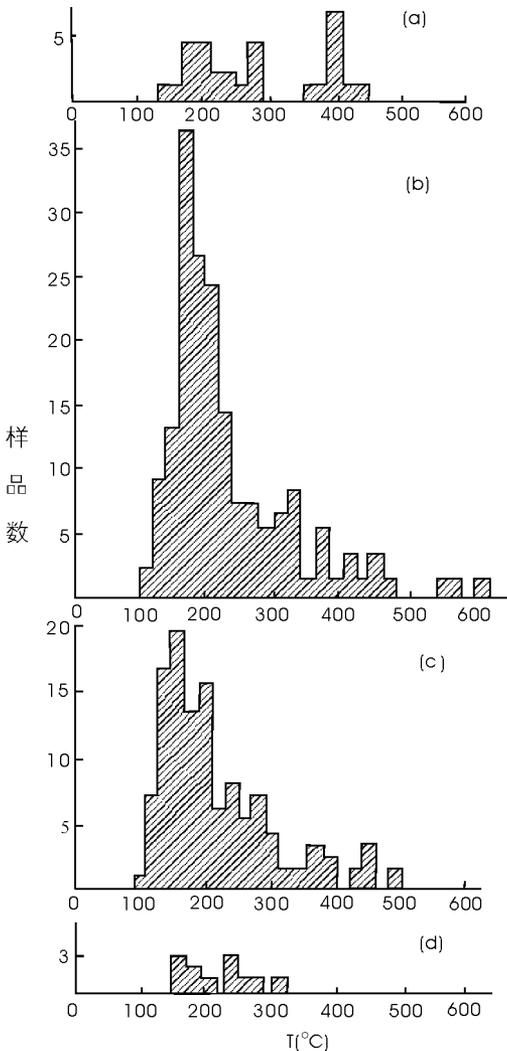


图 1 中条铜矿床包裹体的均一温度频率直方图

Fig. 1 Histogram for homogenization temperatures of inclusion in copper deposit from the Zhongtiao rift zone
a. 胡篔型; b. 铜矿峪; c. 落家河; d. 横岭关

中条裂谷四个铜矿床类型的包裹体化学成分统计列于表 2 及表 3,并绘于图 2。

从图 2 清晰看出,本区四个铜矿床包裹体均富含 Na^+ 、 Cl^- 、 Ca^{2+} ,少 K^+ 、 SO_4^{2-} ,基本不含 F^- 、 Mg^{2+} 。各个矿床的样品投点集中在三角形的 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ 、 $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ 、及 $\text{Ca}^{2+} - \text{K}^+$ 的一边,略呈线性分布。如按液相离子含量,其化学序列如下:

胡篔型铜矿床: $\text{Cl} > \text{Na} > \text{SO}_4 > \text{K} > \text{Ca} > \text{F} > \text{Mg}$;

铜矿峪铜矿床: $\text{Cl} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{SO}_4 > \text{K} > \text{Mg} > \text{F}$;

落家河铜矿床: $\text{Cl} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{SO}_4 > \text{K} > \text{Mg} > \text{F}$;

横岭关铜矿床: $\text{SO}_4 > \text{Cl} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{K} > \text{F} > \text{Mg}$ 。

四个铜矿床包裹体阴、阳离子含量序列大体相似,唯独横岭关铜矿床包裹体中 SO_4 含量稍高,若与密西西比河谷型矿床流体包裹体的离子含量序列 $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ 比较,颇为相似。

另外,四个铜矿床包裹体中皆含有子矿物石盐,含量各不相同。其中铜矿峪流体包裹体测定盐度(wt% NaCl)可分 2 组:高盐度值为 $31.66 \sim 70.09$;低盐度值为 $7.69 \sim 17.09$;横岭关铜矿盐度测定值为 $30.0 \sim 42.92$ 之间,峰值为 $30 \sim 36$;胡篔型铜矿浸染状矿石为 $34.5 \sim 37.5$,而脉状矿石为 $44.5 \sim 46.5$;落家河矿床为 $27 \sim 34$,由此可知本区成矿流体为热卤水溶液。

真允庆等^[1]还分析了落家河铜矿床包裹体的 Cu、Pb、Zr、Ba 含量(表 3),Cu、Zr 含量较高,Pb 含量甚微,与矿石含量特征相同,认为可作为幔源提供铜(钴、金)的佐证。

2.2 CO_2 的来源问题

近年来,金矿或铜矿中 CO_2 的来源问题已引起矿床学家广泛的重视和研究。中条山四个类型铜矿床普遍在成矿晚期出现含铜碳酸盐脉或含铜石英碳酸盐脉,这表明在成矿过程中有大量 CO_2 气体存在,正如上述包裹体富含 CO_2 与 H_2O (表 2)一样,因此亦可称其为造山型铜矿床。关于 CO_2 的来源问题,素有变质流体、大气降水、岩浆流体或岩浆脱气诸论^[6],长期争论不休,莫衷一是。

表 2 中条裂谷铜矿床包裹体化学成分(μg/g)^[5]

Table 2 Chemical composition(μg/g) of inclusion in copper deposit from the Zhongtiao rift zone

元素	胡篁型铜矿床		铜矿峪铜矿床		落家河铜矿床		横岭关铜矿床		
	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}	
液相	Na ⁺	1.94 ~ 29.65	10.7(8)	2.70 ~ 118.8	34.32(16)	2.36 ~ 40.25	14.84(9)	0.31 ~ 1.91	1.1(6)
	K ⁺	0.76 ~ 9.87	3.86(8)	0.26 ~ 29.88	10.21(16)	1.06 ~ 9.16	4.81(9)	0.23 ~ 2.76	1.0(6)
	Ca ²⁺	0.049 ~ 14.15	2.02(8)	0.68 ~ 200.0	40.01(16)	3.88 ~ 51.83	18.52(6)	1.69 ~ 9.48	5.05(6)
	Mg ²⁺	0.015 ~ 0.09	0.05(8)	0.03 ~ 1.23	0.6(5)	0.223 ~ 2.72	1.15(9)	0.20 ~ 0.80	0.41(6)
	F ⁻	0.075 ~ 0.52	0.24(8)	0.02 ~ 1.33	0.41(16)	0.02 ~ 0.853	0.29(9)	0.06 ~ 1.89	0.44(6)
	Cl ⁻	2.38 ~ 59.38	22.15(8)	3.11 ~ 114.62	58.24(16)	0.033 ~ 13.57	5.29(9)	0.89 ~ 15.84	4.67(6)
	SO ₄ ²⁻	0.67 ~ 9.67	3.44(7)	0.5 ~ 113.69	27.01(16)	0.12 ~ 62.68	10.74(9)	0.77 ~ 15.21	5.78(6)
气相	CO ₂	9.27 ~ 221	79.94(8)	13.30 ~ 2160.4	626.61(11)	11.19 ~ 523.9	89.37(9)	4.01 ~ 28.73	13.6(6)
	H ₂ O	97.26 ~ 1838.99	666.18(8)	346 ~ 1154	705.9(11)	214 ~ 1249	614.6(9)	77.6 ~ 94.81	84.18(6)
	CH ₄	0.14 ~ 24.25	12.44(5)	0.24 ~ 2.82	0.65(10)	0.043 ~ 2.11	0.542(9)	0.043 ~ 2.1	0.64(6)
	CO	0.13 ~ 0.23	0.18(2)					0.026 ~ 0.5	0.13(6)
	H ₂			0.14 ~ 5.33	1.05(10)			0.0038 ~ 0.074	0.035(6)

括号内数字为样品数

表 3 落家河铜矿床包裹体 Cu、Pb、Zn、Sr、Ba 成分(μg/g)

Table 3 The Cu、Pb、Zn、Sr、Ba(μg/g) of inclusion in Luojiahe copper deposit

矿物	Cu		Pb		Zn		Sr		Ba	
	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}	区间	\bar{C}
石英(6)	4.0 ~ 36	12.15	0.48 ~ 1.26	0.65	4.3 ~ 25.0	11.88	15.94 ~ 32.26	21.13	6.17 ~ 112.66	26.52
方解石(3)	8.4 ~ 17.6	11.76	0.4 ~ 13.33	5.08	9.8 ~ 22.0	18.00	10.19 ~ 18.08	14.07	0.2 ~ 5.73	3.59

矿物名称后括号内数字为样品数

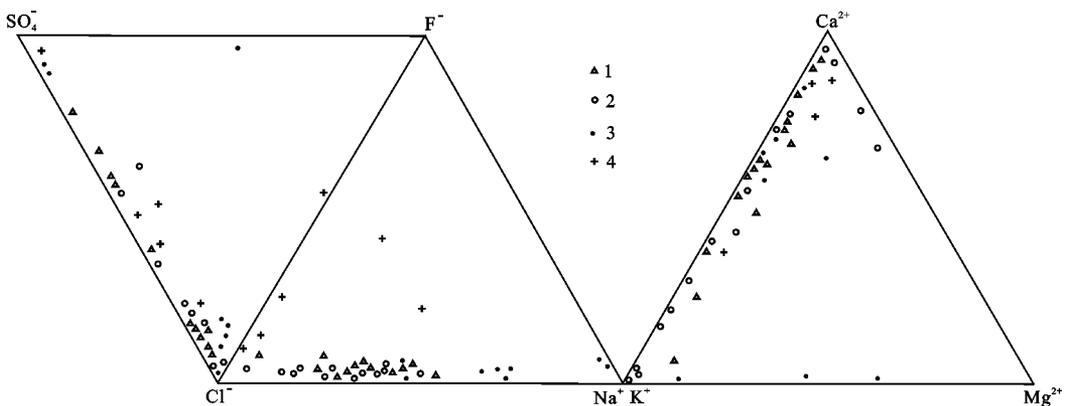


图 2 中条裂谷铜矿床液相包裹体化学成分图解

Fig. 2 Plot for chemical composition of fluid inclusions in copper ore deposit from the Zhongtiao rift zone

1. 铜矿峪; 2. 胡篁型; 3. 落家河; 4. 横岭关

Lowenstern^[7]曾对埃塞俄比亚 Eritrea 省的 Afar 裂谷 A 型流纹岩进行研究,测定 CO₂ 含量为 (40 ~ 60) × 10⁻⁶, ω(H₂O) 为 2% ~ 3.5%。通过数据可以认为地幔流体以 CO₂ 或

CO₂ - H₂O · NaCl 为主^[7,8]。与之对比,铜矿峪包裹体 CO₂ 及 H₂O 含量最高,CO₂ + H₂O 为 1 332.51 μg/g, 矿床规模最大为超大型,但是胡篁型铜矿、落家河铜矿、横岭关铜矿的 CO₂ +

H₂O 含量要少得多,分别为 746.12 μg/g、703.97 μg/g 和 97.78 μg/g,三者均为中-小型铜矿床。因此,CO₂ 和 H₂O 含量与矿床的规模似乎成正相关。

Bailey^[9] 最早提出地幔流体的成分主要由 CO₂ 组成,同时含有碱质组分及 H₂O、Al、Fe、Mn、Co、Ti、Rb、Sr、Zr、Nb、Y、La 等,还有高浓度的 C、卤素和 N₂。杜乐天^[10] 将地幔流体概括为 HACOONS 组成。实际上地幔流体是一种与 CO₂-H₂O(或 C-H₂O)和与碱金属元素为主并与其他挥发组分 F、Cl、S、P、卤素等组成的流

体系统^[4]。本区包裹体的成分(表 2)正符合这一理念,其深部流体主要来自地幔。再结合铅同位素和氢氧同位素的组成特征研究^[11],铜矿峪铜矿来自岩浆水较为明显,其它三个矿床则有大气降水渗入,四个铜矿床的物质来源均和地壳物质参与关系密切,不容忽视。

3 碳、氧同位素地球化学

3.1 碳、氧同位素组成

本区四个类型铜矿的碳、氧同位素分析结果列于表 4,并将分析数据投于图 3。

表 4 中条裂谷 4 个主要铜矿床碳、氧同位素组成^[7]

Table 4 The C and O isotopic composition for 4 major type of copper deposits from Zhongtiao rift zone

(‰)	胡篁型铜矿床			铜矿峪铜矿床	横岭关铜矿床		落家河铜矿床		
	矿石方解石(17)	近矿灰岩(6)	变质灰岩(18)	矿石方解石(16)	矿石方解石(2)	菱铁矿(1)	矿石方解石(3)	变质灰岩(4)	石墨片岩(5)
δ ¹³ C _{PDB}	-8.9~3.3	-15~4.8	-3.6~4.2	-3.44~1.65	-5.29~-2.6	-9.14	-5.97~-0.94	-1.36~3.09	-25.09~-36.35
δ ¹⁸ O _{SMOW}	10.1~17.3	15.2~18.1	18.2~22.4	12.10~19.83	12.77~19.83	21.97	10.91~12.66		

矿物名称后的括号内数字为样品数

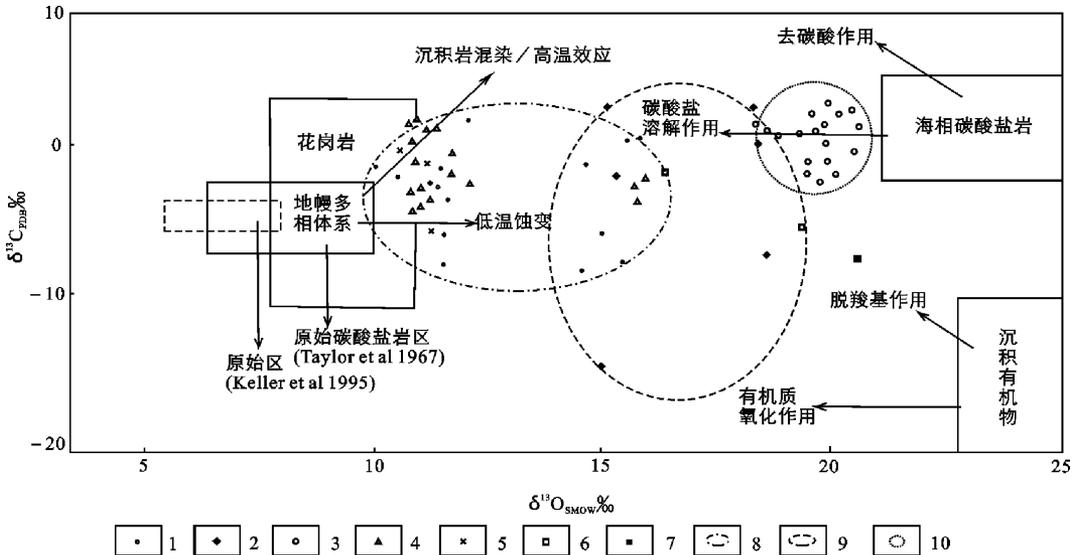


图 3 中条铜矿集中区矿石中方解石、菱铁矿及灰岩的 δ¹⁸O-δ¹³C 图解

(据刘建明等 1997 和毛景文等 2002 资料^[6]修改)

Fig. 3 δ¹⁸O versus δ¹³C diagram of calcite, siderite and carbonates in copper ore from the Zhongtiao metallogenic concentration area

1~3. 分别为胡篁型矿区的矿石、矿化灰岩及石灰岩;4. 铜矿峪;5. 落家河;6~7. 分别为横岭关的矿石、菱铁矿;8. 铜矿石;9. 矿化灰岩;10. 中条群石灰岩

图 3 清楚地显示中条裂谷四个主要铜矿床的碳、氧同位素的投点,全部落在“地幔多相体系—花岗岩区”与“海相碳酸盐岩区”之间,而且

铜矿峪、胡篁型、落家河三个矿床的部分样品的投点落在“花岗岩”范围内,无一样品超越“花岗岩区”之上。胡篁型矿区内的矿化石灰岩是在

“矿石趋势区”和“变质大理岩趋势区”(图 3 之 8 与 10)的中部,三者具有线性关系,回归线性方程式为 $\delta^{13}C_{PDB} = 0.269\delta^{18}O_{SMOW} - 0.469$, 相关系数 $r = 0.495^{[11]}$, 与 Rye & Williams 的实验结果一致,说明是在 H_2CO_3 的水溶液中沉淀出碳酸盐矿物。同时亦阐明碳、氧同位素是随温度上升 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 的分馏有着降低状况,继而达到

表 5 铜矿峪铜矿与胡篁型铜矿不同期次的铜矿 $\delta^{18}O_{SMOW} - \delta^{13}C_{PDB}$ 同位素对比

Table 5 $\delta^{18}O_{SMOW} - \delta^{13}C_{PDB}$ isotopic composition of different stage copper ores between Tongkuangyu type and Hu - Bi type copper deposits

铜矿床	矿化期次	$\delta^{18}O_{SMOW} \%$			$\delta^{13}C_{PDB} \%$		
		变化范围	σ_{n-1}	\bar{C}	变化范围	σ_{n-1}	\bar{C}
胡篁型	早期(7)	10.4~17.50	2.58	13.97	-8.9~0.4	3.31	-2.80
	晚期(5)	11.9~13.50	0.65	12.96	-3.5~2.0	2.32	-1.80
铜矿峪	早期(12)	12.10~17.09	1.89	13.70	-0.62~-6.68	1.63	-3.44
	晚期(4)	12.31~12.83	0.22	12.51	-0.96~1.05	0.95	0.39

括号内数字为样品数

有趣的是胡篁型铜矿床和铜矿峪铜矿床早期和晚期矿石的平均 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值非常相似,前者分别为 13.97‰ 和 13.70‰,后者分别为 12.96‰ 和 12.50‰;而平均 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值稍有差别,但差异不大,前者分别为 -2.80‰ 和 -3.44‰,后者分别为 -1.80‰ 和 0.39‰。总体来说,早期浸染状矿石 $\delta^{18}O_{SMOW}$ 平均值比晚期脉状矿石(脉)要大, $\delta^{13}C_{PDB}$ 平均值则相反。两矿区早期矿石的样品投点呈离散状,可能反映热液中溶解碳为 $[HCO_3]^-$,而晚期脉状矿石呈线性展布,可能反映热液中溶解的为 H_2CO_3 。这种现象与我国东川铜矿及密西西比河谷型铅锌矿床的早期和晚期矿石 $\delta^{18}O_{SMOW} - \delta^{13}C_{POB}$ 的组成正好相反,它们早期矿石呈线性,晚期矿石呈离散状。其产生原因,可能系成矿温度不同所致,因为铜矿峪早期矿石的均一温度为 280 ~ 360 °C,晚期脉状矿石的均一温度为 140 ~ 240 °C;胡篁型铜矿早期浸染状矿石温度为 360 ~ 460 °C,晚期脉状矿石温度为 140 ~ 300 °C。然而东川铜矿(落雪亚式)早期层状铜矿均一温度为 109 ~ 209 °C,平均温度为 169 °C,晚期脉状均一温度为 131 ~ 390 °C,平均温度为 230 °C。密西西比河谷型矿床也有类似情况。

再看胡篁型铜矿床,其成矿围岩为古元古界中条群余家山组和余元下组石灰岩, $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 -3.6‰ ~ -4.2‰, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 值为 18.2‰ ~

新的平衡。

虽然铜矿峪铜矿床与胡篁型铜矿床的成因有所不同,但是它们的矿石构造均呈细脉浸染状,并常有晚期团块状矿脉穿插其中(多成富铜矿石)。其早、晚期矿石的 $\delta^{13}C_{PDB} - \delta^{18}O_{SMOW}$ 同位素组成列于表 5,并绘于图 4。

22.4‰,非常集中(图 3),与正常海相灰岩的碳、氧同位素($\delta^{13}C_{PDB} = 0 \pm 4\%$, $\delta^{18}O_{SMOW} = 20\%$ ~ 24‰)相当,在图 3 位置上和“海相碳酸盐岩区”略有平移。蚀变矿化灰岩 $\delta^{13}C_{PDB}$ 为 -15‰ ~ 4.8‰, $\delta^{18}O_{SMOW}$ 为 15.2‰ ~ 18.1‰,表现为不同程度轻微飘移,可能系成矿热液与碳酸盐发生交代作用,或因围岩中赋存碳质片岩或含石墨片岩提供了有机质的缘故。

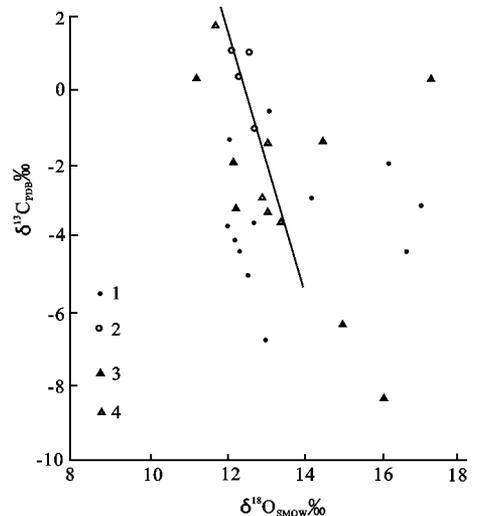


图 4 铜矿峪型与胡篁型铜矿床不同期次铜矿石 $\delta^{18}O - \delta^{13}C$ 同位素组成对比

Fig. 4 Comparison of the $\delta^{18}O - \delta^{13}C$ isotopic composition for different stages between Tongkuangyu-type and Hu - Bi type copper deposits

1. 铜矿峪铜矿早期矿化; 2. 铜矿峪铜矿晚期矿

化; 3. 胡篁型铜矿早期矿化; 4. 胡篁型铜矿晚期矿化

3.2 地质示踪意义初探

众所周知,地幔的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化很大,显示了双峰特征,主峰众数为 -5.5% (主要范围 -2% ~ -9%),可能代表原始碳的组成。同时在 -15% ~ -25% 区间还有一个低缓的次峰,这可能是陆壳俯冲、拆沉作用等引起。结合本区四个类型铜矿床矿石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -3.3% ~ -8.3% 相对变化较小,与许多热液矿床的 $\delta^{13}\text{C}$ 相类似,特别是和云南白秧坪银铜多金属矿集区的碳、氧同位素很相像^[12]。这些碳可能来自地幔,或者来自碳酸盐与有机质 CO_2 的混合作用。然而,本区矿石中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围较窄,且大于有机质的碳同位素,所以可排出有机质提供碳源的可能性。

很显然,本区四个类型铜矿床矿石样品的碳、氧同位素组成在 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 图解上总体呈近水平展布(图 3),可能有两个原因^[6]:其一, CO_2 的脱气作用;其二,流体与围岩间的水-岩反应。前已述及,本区四个铜矿床的包裹体皆以含 H_2O 为主(表 2),当 CO_2 发生去气作用

时,氧同位素的组成变化不大,而对碳同位素组成的影响则很明显。我们知道,方解石在热液流体中的溶解度是随温度降低而升高,随压力的降低而降低,结合本区 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 组成分析(图 3),其矿石的投点可分两个族群,除了靠近“地幔多相体系-花岗岩”一组外,尚有另一组在矿化灰岩趋势范围之内或重叠,这充分说明方解石的沉淀是水-岩反应及温度降低藕合作用的结果,所以上述两个因素兼而有之。

这里尚需说明,在图 3 上有部分样品落在“花岗岩区”,但决不能仅据这一点就认为成矿流体是由岩浆水提供,因为前述的包裹体中 K/Na 比值均小于 1,如铜矿峪 K/Na 比值为 0.3,胡篁型铜矿 K/Na 比值为 0.36,落家河为 0.32,横岭关为 0.96,都与典型岩浆水所具有的 $\text{K}/\text{Na} > 1$ 迥异,从而证明成矿流体并非单纯的岩浆水^[12]。另外笔者曾对中条铜矿石进行过氢、氧同位素研究^[11](表 6),业已显示胡篁型铜矿、落家河铜矿及横岭关铜矿的成矿流体有天水参与,而与铜矿峪铜矿不同。

表 6 中条裂谷铜矿床氢氧同位素组成^[7]

Table 6 The H and O isotopic composition in copper deposit from Zhongtiao rift zone

矿物	铜矿峪铜矿			横岭关铜矿			落家河铜矿			胡篁型铜矿		
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}$	$\delta\text{D}_{\text{水}}$									
石英	9.75~	3.69~	-30.2~	8.02~	-2.47~	-113.3~	9.16~	-0.36~	-28.4~	12.88~	3.06~	-31.80~
	16.30	10.05	-84.9	11.09	1.64	-58.8	11.22	8.40	-57.30	17.82	8.87	-40.00
	(13)	(12)	(17)	(6)	(6)	(5)	(6)	(10)	(6)	(4)	(4)	(4)
方解石	12.6~	8.54~	-40~				10.91~	0.51~	-55.5~	12.38~	4.46~	-37.00~
	30.62	9.39	99.9				12.66	4.85	-70.0	15.08	5.89	-72.2
	(4)	(3)	(4)				(3)	(3)	(3)	(7)	(7)	(7)

括号内数字为样品数

综上所述,本区铜矿石的碳、氧同位素及包裹体资料可以示踪深部流体的来源,虽然它们主要来自地幔,但并不排除有岩浆及大气降水和溶解围岩的物质成分渗入因素。

4 结束语

中条铜矿富集区的形成,不是一个孤立事件,而是整个区域地质背景和构造历史演化的必然结果。

由于在新太古代—古元古代期间,区内古板块俯冲作用和地幔热柱活动相辅相成,促使岩石圈拆沉,软流圈上涌。中条裂谷内双峰态

火山活动、S型花岗岩侵入频繁使其成为大型火成岩省(LIP)以及地壳多期“闭合”等因素均是成矿作用的前提^[13]。本区 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 组成更进一步证明成矿物质明显带有地幔源的烙印,并有岩浆热液、天水渗入和地壳物质的参与,中条铜矿即是由它们构建的复杂的成矿系统。

参考文献:

- [1] 真允庆,杜继盛,刘丽玲,等. 中条裂谷与落家河铜矿床[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993,96-99.
- [2] 孙继源,冀树楷,真允庆. 中条裂谷铜矿床[M]. 北京:

地质出版社,1995,1-48.

[3] 真允庆. 中条裂谷铜矿床的成矿规律及其找矿方向[J]. 桂林工学院学报,1999,19(1):9-18.

[4] 毛景文,李晓峰. 深部流体及其与成矿成藏关系研究现状[J]. 矿床地质,2004,23(4):520-528.

[5] 真允庆. 中条裂谷铜矿成矿流体的物理化学条件[J]. 桂林工学院学报,1995,15(2):113-122.

[6] 毛景文,赫英,丁悌平. 胶东金矿形成期间地幔流体与成矿过程的碳氧同位素证据[J]. 矿床地质,2002,21(2):121-128.

[7] Lowenstern J B, Clyne M A and Bullen T D. Comagmatic A-type granophyre and rhyolite from the Alid volcanic center, Eritrea northeast Africa [J]. J. Petrol., 1997, 38: 1 707-1 721.

[8] Lowenstern J B. Carbon dioxide in magmas and impli-

cations for hydrothermal systems[J]. Mineralium Deposita, 2001, 36: 490-502.

[9] Baileg D K. Continental rifting mantle degassing[A]. In: Neumann and Ramberg. Petrology and geochemistry of continental rifting [C]. 1978,1-13.

[10] 杜乐天. 幔汁(HACONS 流体)的重大意义[J]. 大地构造与成矿学,1990,13(1):91-99.

[11] 真允庆. 中条裂谷铜矿床稳定同位素地球化学[J]. 桂林工学院学报,1998,18(3):215-227.

[12] 刘家军,何明勤,李志明. 云南白秧坪银铜多金属矿集区碳氧同位素组成及其意义[J]. 矿床地质,2004,23(1):1-10.

[13] 真允庆. 中条幔柱构造的岩浆活动与成矿[J]. 桂林工学院学报,2005,25(1):1-12.

Carbon and Oxygen Isotope Implications for the Fluid of Copper Ore in Zhongtiaoshan Area

ZHEN Yun-qing¹, SHU Qian-an²

(1. *The third Geo-exploration Bureau, of Metallurgical Industry, Taiyuan 030002, China;*

2. Geological Brigade No. 814, East China Geo-exploration Bureau for Nonferrous Metals, Zhenjiang 212005, China)

Abstract: There are two main types of copper deposits in the Zhongtiaoshan area, the porphyry copper type represented by the Tongkuangyu deposit and the metamorphosed submarine exhalative type represented by the Hu-Bi, Luojahe and Henglingguan deposits. Carbon and Oxygen isotope compositions of these four deposits are plotted unexceptionally between the “mantle multiple system-granite” and the “marine carbonate” areas on the $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ vs. $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ diagram, indicating that these deposits constitute an assemblage of hydrothermal deposits. The ores characterized by $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ between -3.3% and -8.3% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ between 10.1% and 19.83% , fluid inclusions with $\text{K}/\text{Na} < 1$ and enrichment in Cu, suggesting that the deep-sourced fluids are very complicated ore-forming systems composed of mantle fluids, magmatic fluids, meteoric water and crustal components.

Key words: deep-sourced fluid; carbon and oxygen isotope composition; fluid inclusion; copper deposit; Zhongtiaoshan