

湖北徐家山锑矿床方解石 C、O、Sr 同位素地球化学

沈能平^{1,2}, 彭建堂^{1*}, 袁顺达^{1,2}, 张东亮^{1,2}, 符亚洲¹, 胡瑞忠¹

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 湖北通山的徐家山锑矿床产在上震旦统陡山沱组和灯影组的海相碳酸盐岩中。对该矿床中成矿前和成矿期方解石进行了较系统的 C、O、Sr 同位素地球化学研究, 结果表明, 成矿前方解石具相对较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($-0.7\text{‰} \sim +2.0\text{‰}$)、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ($+18.6\text{‰} \sim +19.6\text{‰}$) 和 Sr 含量 (2645 ~ 8174 $\mu\text{g/g}$, 平均 5656 $\mu\text{g/g}$), 及较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.7096 ~ 0.7097); 而成矿期方解石具相对较低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($-3.9\text{‰} \sim -2.1\text{‰}$)、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ($+11.5\text{‰} \sim +15.3\text{‰}$)、Sr 含量 (785 ~ 2563 $\mu\text{g/g}$, 平均 1571 $\mu\text{g/g}$), 和较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.7109 ~ 0.7154, 平均 0.7141)。分析认为, 成矿前方解石的 C、O 和绝大部分 Sr 来源于赋矿围岩——震旦系海相碳酸盐岩; 而成矿流体为富 H_2CO_3 的溶液, 它来自或流经富放射成因 ^{87}Sr 的下伏基底碎屑岩——中元古界冷家溪群浅变质岩; 该流体与围岩发生水-岩反应导致成矿期方解石和辉锑矿的沉淀。

关键词: 方解石; C、O、Sr 同位素; 成矿流体; 徐家山锑矿床; 湖北省

中图分类号: P597; P611

文献标识码: A

文章编号: 0379-1726(2007)05-0479-07

Carbon, oxygen and strontium isotope geochemistry of calcites from Xujiashan antimony deposit, Hubei Province

SHEN Neng-ping^{1,2}, PENG Jian-tang^{1*}, YUAN Shun-da^{1,2},
ZHANG Dong-liang^{1,2}, FU Ya-zhou¹ and HU Rui-zhong¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Xujiashan antimony deposit is located at Tongshan County, Hubei Province, and its antimony mineralization occurs in the marine carbonates of Upper Sinian Doushantuo Formation and Dengying Formation. The carbon, oxygen and strontium isotopic compositions of calcites developed during both pre- and syn-mineralization at this deposit are determined in this study. The results show that the pre-mineralization calcites display relatively high $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($-0.7\text{‰} \sim +2.0\text{‰}$) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values ($+18.6\text{‰} \sim +19.6\text{‰}$), and low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.7096 ~ 0.7097) with high Sr concentrations ranging from 2645 to 8174 $\mu\text{g/g}$ and an average of 5656 $\mu\text{g/g}$. Whereas the syn-mineralization calcites have relatively low $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($-3.9\text{‰} \sim -2.1\text{‰}$) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ values ($+11.5\text{‰} \sim +15.3\text{‰}$), but high $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.7109 ~ 0.7154, with an average of 0.7141) with low Sr concentrations varying from 785 to 2563 $\mu\text{g/g}$ and an average of 1571 $\mu\text{g/g}$. It was revealed that the carbon, oxygen, and predominant Sr of the pre-mineralization calcites might be directly come from the host rocks, the Sinian marine carbonates. The ore-forming fluid characterized by H_2CO_3 -enriched was probably derived from or flowed through the underlying radiogenic Sr-enriched clastic basement, the low-grade metamorphic rocks of Mesoproterozoic Lengjiayi Group. It is suggested that the precipitation of the syn-mineralization calcite and the intergrown stibnite in the Xujiashan antimony deposit resulted from fluid-rock interaction between host rocks (the Sinian marine carbonates) and fluids from underlying clastic basement (the low-grade metamorphic rocks of Lengjiayi Group).

收稿日期(Received): 2007-03-21; 改回日期(Revised): 2007-05-24; 接受日期(Accepted): 2007-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(40673021, 40472053)

作者简介: 沈能平(1979-), 男, 博士研究生, 矿床地球化学专业, 主要从事锑矿的成矿理论研究。

* 通讯作者(Corresponding author): PENG Jian-tang, E-mail: pengjiantang@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5895405

Key words: calcite; carbon, oxygen and strontium isotopes; ore-forming fluid; Xujiashan antimony deposit; Hubei Province

0 引言

成矿流体性质、来源与演化一直是热液矿床研究中最为关注的问题之一。传统的 C、O 同位素研究在示踪成矿流体源区和性质上具有优势,但难以判断流体的流经路线和运移过程。Sr 同位素研究正好可以弥补这一不足,因为在不同的地质环境下, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化范围明显不同,且成矿流体中的 Sr 一般是源区 Sr 和流经途径 Sr 的叠加^[1],包含了源区和运移途径的信息。碳酸盐矿物方解石是进行这方面探讨的理想对象,因为我们可以同时对其进行 C、O、Sr 同位素测定,从而将两者的示踪优势结合起来。近些年来,热液方解石的 C、O、Sr 同位素研究在热液矿床成因研究中得到了广泛应用^[2-7]。

徐家山锑矿位于湖北省通山县境内,是鄂南地区最重要的锑矿床。尽管前人对该矿的矿床地质特征、稳定同位素(C、O、S)、流体包裹体、矿物标型特征(辉锑矿)等进行了较多研究^[8-14],但对其成矿流体的性质、来源与流体演化特征等方面的认识仍显不足,并存在较大分歧。部分学者认为该矿的成矿流体主要为下渗的大气降水^[8-11],而另外一些学者则认为深部岩浆热液参与了成矿作用^[13]。由于脉石矿物方解石贯穿徐家山锑矿的整个成矿过程,因此我们选择该矿不同期次热液方解石,试图通过系统研究其 C、O、Sr 同位素地球化学特征,来探讨该矿床的成矿流体性质、来源及演化等重要问题,以期为进一步认识矿床成因与成矿机制等奠定基础。

1 地质特征简介

在构造上,徐家山锑矿床位于下扬子地台褶皱带南缘,大幕山短轴背斜北翼东段近核部处(图 1)。矿区内出露地层主要是下震旦统南沱组冰碛含砾砂质泥岩、上震旦统陡山沱组和灯影组碳酸盐岩、硅质岩及下寒武统东坑组的一部分^[12]。锑矿体均赋存于陡山沱组和灯影组海相碳酸盐岩地层中。该矿的矿物组合较简单,金属矿物主要是辉锑矿及其氧

化物(锑华、锑赭石),另有少量黄铁矿、闪锌矿等;脉石矿物以石英为主,其次为方解石、重晶石及微量的锆石、榍石、磷灰石、长石等副矿物和碎屑矿物。矿石类型包括石英-方解石-辉锑矿型、石英-方解石-重晶石-辉锑矿型、方解石-重晶石-辉锑矿型、石英-重晶石-辉锑矿型和石英-辉锑矿型等五种类型。围岩蚀变以硅化为主,方解石化、重晶石化和黄铁矿化次之^[8,10]。

方解石是该矿最主要的脉石矿物之一,根据其生成与锑矿化发生的时间先后关系,主要可分为成矿前和成矿期两期。成矿前方解石一般呈白色、乳白色,呈不规则脉状和团包状广泛分布于围岩中;成矿期方解石一般呈白色、灰白色,呈脉状、斑团状与辉锑矿共生,该期方解石与含矿的脉状硅化相伴出现,其产状和矿物组合与脉状硅化相似,分布范围也相当^[1]。

2 样品的采集与测试

本研究所用的 25 件方解石样品,除 XJS-1 和 XJS-2 为废石堆捡块样外,其余均采自井下坑道 +363 中段、+323 中段的新鲜工作面上。先将所有样品碎至 40~80 目,在双目镜下手工剔除杂质,使方解石的纯度达到 99% 以上,再用玛瑙研钵研磨至可过 200 目筛。

C、O 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部同位素实验室完成。分析采用 100% 磷酸法,在 25℃ 时,样品与磷酸发生反应,将反应释放出来的 CO₂ 在 Finnigan 公司 MAT-251 EM 型质谱仪上进行 C、O 同位素组成测定,分析精密度的(2 σ)为 $\pm 0.2\%$ 。所有分析结果 $\delta^{13}\text{C}$ 以 PDB 为标准, $\delta^{18}\text{O}$ 以 SMOW 为标准。

Sr 化学分离和同位素比值测试在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。先称取 100 mg 左右样品,加入适量纯化的 2.5 mol/L HCl 试剂溶解;将溶好的清液移入离心管,放入离心机中离心 10 min;使用装 2 mL AG-50W-X12 交换树脂(200~400 目)的石英交换柱进行 Sr 的分

1) 湖北省鄂东南地质大队,湖北省通山县徐家山锑矿床详细普查地质报告,1985。

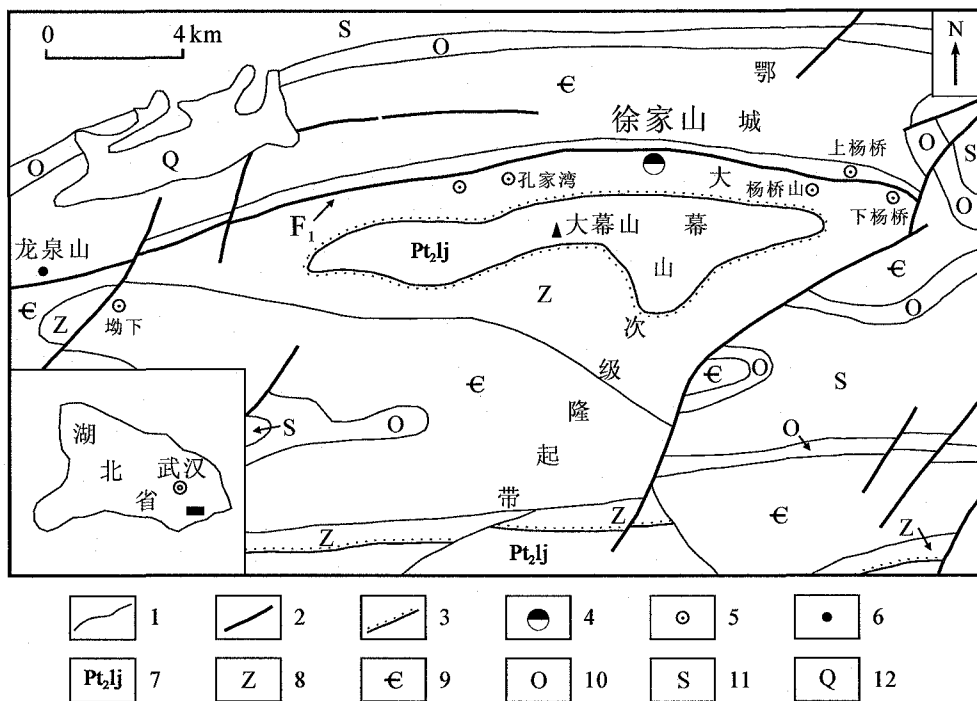


图 1 湖北通山县大幕山锑矿田地质图(据俞惠隆^[10]修改)

Fig. 1 Geological map of the Damushan antimony orefield, Tongshan County, Hubei Province (modified after Yu^[10])

1 - 地质界线; 2 - 断裂; 3 - 角度不整合; 4 - 锑矿床; 5 - 锑矿点; 6 - 汞锑矿点; 7 - 中元古界冷家溪群; 8 - 震旦系; 9 - 寒武系; 10 - 奥陶系; 11 - 志留系; 12 - 第四系。

1 - Geological boundary; 2 - Fault; 3 - Angular unconformity; 4 - Antimony deposit; 5 - Antimony occurrence; 6 - Mercury-antimony occurrence; 7 - Mesoproterozoic Lengjiaxi Group; 8 - Sinian; 9 - Cambrian; 10 - Ordovician; 11 - Silurian; 12 - Quaternary.

离和纯化。Sr 同位素比值测定在 Finnigan 公司 MAT-262 型热电质谱计上完成, 所有测试数据均用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 进行校正。该实验室对国际标样 NBS 987 分析结果为 $0.710226 \pm 12 (n = 8)$ 。详细的化学流程和同位素比值测定可见文献[15-16]。此外, Rb 和 Sr 含量测试由香港大学地球科学系和中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室 ICP-MS 室共同完成。

3 测试结果

3.1 C、O 同位素

徐家山锑矿床中方解石的 C、O 同位素组成测试结果见表 1 和图 2。从中可知, 成矿前方解石具相对较高的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-0.7\text{‰} \sim +2.0\text{‰}$ (平均 $+0.8\text{‰}$), $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 为 $+18.6\text{‰} \sim +19.6\text{‰}$ (平均 $+19.1\text{‰}$); 这种 C、O 同位素组成与典型的海相碳酸盐岩 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = 0\text{‰} \pm 4\text{‰}$; $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} = +20\text{‰} \sim +24\text{‰}$)^[17-18] 较为一致, 暗示其 C、O 直接来源于海相碳酸盐岩, 围岩中碳酸盐矿物

溶解和重新结晶可能是该期方解石形成的主要机制。与成矿前方解石相比, 成矿期方解石明显亏损 ^{13}C 、 ^{18}O , 具相对较低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ($-3.9\text{‰} \sim -2.1\text{‰}$, 平均 -3.1‰) 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ($+11.5\text{‰} \sim +15.3\text{‰}$, 平均 $+13.3\text{‰}$), 且两者具有明显的正相关关系 (图 2)。

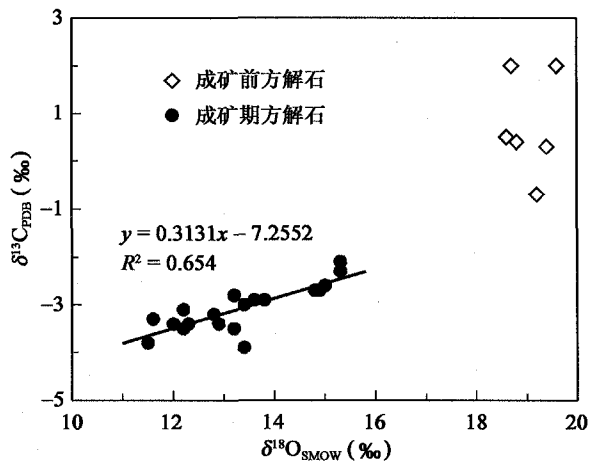


图 2 徐家山锑矿床方解石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 图解

Fig. 2 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ diagram of calcites from the Xujiaoshan antimony deposit

表1 徐家山锑矿床方解石的C、O同位素组成

Table 1 Carbon and oxygen isotope compositions of calcites from the Xujiashan antimony deposit

期次	样号	采样位置	产状	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} (\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} (\text{‰})$
成矿前 方解石	XJS-10	+323 中段	与石英共生脉	+2.0	+18.7
	XJS-11	+323 中段	与石英共生脉	-0.7	+19.2
	XJS-22	+323 中段	方解石脉	+0.4	+18.8
	XJS-38	+323 中段	与石英共生脉	+0.3	+19.4
	XJS-42	+323 中段	与石英共生脉	+0.5	+18.6
XJS-45	+363 中段	方解石脉	+2.0	+19.6	
成矿期 方解石	XJS-1	废石堆,来自于+323 中段	方解石脉	-2.9	+13.8
	XJS-2	废石堆,来自于+323 中段	方解石脉	-2.1	+15.3
	XJS-3	+323 中段	与辉锑矿共生	-3.4	+12.3
	XJS-6	+323 中段	方解石脉	-3.8	+11.5
	XJS-7	+323 中段	与辉锑矿共生	-3.3	+11.6
	XJS-8	+323 中段	方解石脉	-3.2	+12.8
	XJS-13	+323 中段	与辉锑矿共生	-3.0	+13.4
	XJS-14	+323 中段	与辉锑矿共生	-2.9	+13.6
	XJS-16	+323 中段	与辉锑矿共生	-2.7	+14.9
	XJS-27	+323 中段	与辉锑矿共生	-3.9	+13.4
	XJS-30	+323 中段	方解石脉	-2.3	+15.3
	XJS-31	+323 中段	方解石脉	-2.6	+15.0
	XJS-41	+323 中段	方解石脉	-3.5	+12.2
	XJS-48	+363 中段	方解石脉	-3.4	+12.0
	XJS-50	+363 中段	方解石脉	-2.7	+14.8
	XJS-52	+363 中段西洞口	与石英共生脉	-3.1	+12.2
	XJS-53	+363 中段	与辉锑矿共生	-2.8	+13.2
	XJS-57	+363 中段	与石英共生脉	-3.5	+13.2
	XJS-59	+363 中段	与辉锑矿共生	-3.4	+12.9

注:由中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部同位素实验室罗续荣分析。

3.2 Sr 含量及其同位素

徐家山锑矿床中方解石的 Sr 含量及其同位素组成见表 2 和图 3。从中可知,成矿前方解石 Sr 含量高,介于 2645 ~ 8174 $\mu\text{g/g}$ 之间,平均为 5656 $\mu\text{g/g}$ 。相对而言,成矿期方解石 Sr 含量要低得多 (785 ~ 2563 $\mu\text{g/g}$, 平均 1571 $\mu\text{g/g}$)。值得指出的是,在整个华南锑矿带中很少见热液含钙矿物中有如此高的 Sr 含量,徐家山方解石中的 Sr 含量明显高于该带锡矿山锑矿床中的方解石 (87 ~ 273 $\mu\text{g/g}$, 平均 160 $\mu\text{g/g}$)^[7]和晴隆锑矿床中的萤石 (34 ~ 179 $\mu\text{g/g}$, 平均 60 $\mu\text{g/g}$)^[19],而与湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中白钨矿的 Sr 含量大体相当 (650 ~ 6809 $\mu\text{g/g}$, 平均 2434 $\mu\text{g/g}$)^[20-21]。该矿不同期次方解石的 Sr 同位素组成明显不同,成矿期方解石明显比成矿前方解石富放射成因 ^{87}Sr : 前者的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围较大,为

0.7109 ~ 0.7154, 平均为 0.7141; 后者的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化较小,为 0.7096 ~ 0.7097。此外,对比发现,徐家山锑矿床中绝大多数成矿期方解石的 Sr 同位素组成高于锡矿山成矿期方解石 (0.7102 ~ 0.7144, 平均 0.7115)^[7]和晴隆成矿期萤石 (0.7077 ~ 0.7131, 平均 0.7088)^[19]; 但明显小于沃溪矿床中的白钨矿 (0.7468 ~ 0.7504, 平均 0.7492)^[20-21]。

4 讨论

4.1 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的正相关性

从理论上讲,以下三种情况可导致方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间呈正相关关系^[6, 22, 23]: (1) 流体的混合作用; (2) CO_2 去气作用; (3) 流体与围岩之间的水-岩反应。

流体混合必须满足两种或两种以上的流体同时出现,且参与混合的流体,其 C、O 同位素组成和温度明显不同。尽管这种机制在理论上是成立的,但在自然界中十分罕见;郑永飞^[24]就曾指出,目前尚未观察到自然界热液方解石 C、O

同位素组成服从流体混合模式。如果 C、O 同位素组成的线性关系是由 CO_2 的去气作用所致,则该作用对流体 O 同位素组成的影响并不明显,而对 C 同位素组成的影响显著^[24],从而导致从该溶液中沉淀的方解石,其 C 同位素组成变化显著。显然,这与我们的测试结果不符。另外,在显微镜下也未发现有流体沸腾的迹象以及激光拉曼光谱中显示流体包裹体气相成分 CO_2 含量极低,这些都表明 CO_2 的去气作用不应是导致方解石沉淀的主要因素。因此,我们认为流体与围岩之间的水-岩反应才是导致徐家山成矿期方解石和辉锑矿沉淀的主要机制。该矿成矿期方解石的 C、O 同位素组成呈线性正相关,也证实这种推论。前人的研究表明,当热液中的溶解碳主要以 H_2CO_3 形式存在时,通过水-岩反应机制形成的方解石,其 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 往往呈线性正相关关系^[6, 22]。

表 2 徐家山锑矿床方解石 Rb、Sr 含量及 Sr 同位素组成

Table 2 Rubidium, strontium concentrations and strontium isotope composition of calcites from the Xujiashan antimony deposit

序号	样号	期次	Rb(μg/g)	Sr(μg/g)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ± 2σ
7	XJS-10	成矿期	0.08	2645	0.709705 ± 12
8	XJS-11		0.24	6740	0.709646 ± 12
12	XJS-22		4.61	6412	-
16	XJS-38	成矿前	2.49	3249	-
18	XJS-42		1.74	6713	0.709552 ± 13
19	XJS-45	方解石	1.28	8174	-
1	XJS-1	成矿期	0.35	1040	0.712409 ± 13
2	XJS-2		0.22	1886	0.710891 ± 13
3	XJS-3		0.28	2245	0.715043 ± 15
4	XJS-6		0.16	1639	0.715229 ± 12
5	XJS-7		0.12	1749	0.714724 ± 13
6	XJS-8		1.44	2563	0.715222 ± 11
9	XJS-13		0.16	1873	0.714333 ± 11
10	XJS-14		0.15	2350	0.714433 ± 13
11	XJS-16		0.04	1446	0.715369 ± 12
13	XJS-27		4.90	1935	0.714422 ± 13
14	XJS-30		4.22	934	0.711699 ± 10
15	XJS-31	3.34	1124	-	
17	XJS-41	2.79	1770	-	
20	XJS-48	成矿前	2.35	1392	0.714983 ± 12
21	XJS-50		1.73	785	0.712300 ± 10
22	XJS-52		1.98	1013	0.714690 ± 12
23	XJS-53	方解石	1.34	1025	-
24	XJS-57		1.16	1520	-
25	XJS-59		2.20	1558	0.715108 ± 13

注：Rb、Sr 测试：序号 1-11 在香港大学地球科学系完成，分析者：彭建堂，漆亮；序号 12-25 在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成，分析者：冯家毅；⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值在中国科学院地质与地球物理研究所固体地球化学同位素实验室完成，分析者：符亚洲，沈能平。“-”号表示未测定。

4.2 Sr 同位素的指示意义

从表 2 可知，徐家山锑矿床成矿前和成矿期方解石的 Rb 含量都非常低(0.04 ~ 4.90 μg/g)，这与方解石的晶体化学结构特征相吻合：在含钙矿物晶格中，Ca 的位置能有限地容纳 Sr 而不接受 Rb^[25]，前人的研究也充分证实了这一点^[20, 21, 26, 27]。而且，徐家山方解石中 Sr 含量非常高，故该矿方解石中 Rb 原地衰变产生的 ⁸⁷Sr，对其 Sr 同位素组成的影响可忽略不计，即该矿方解石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 测定值可以代表其形成时母源流体的 Sr 同位素组成。

由于古海水中的 Sr 同位素组成相当均一，且海水中碳酸盐矿物沉淀时不会发生明显的同位素分馏^[28]，故海相碳酸盐岩的 Sr 同位素组成具有全球对比意义。全球范围内古海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值在震旦

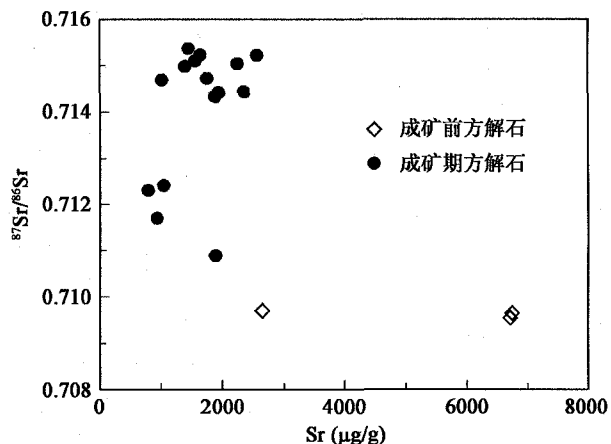


图 3 徐家山锑矿床方解石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-Sr 图解
Fig. 3 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr-Sr diagram of calcites from the Xujiashan antimony deposit

纪后一般均小于 0.709^[28-31]，而在震旦纪前后与 0.709 接近^[30]。本区震旦纪陡山沱期和灯影期海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.7077 ~ 0.7084^[32]。由表 2 不难发现，徐家山锑矿床中成矿前方解石的 Sr 同位素组成(0.7096 ~ 0.7097)基本与震旦纪海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值接近，且其 Sr 含量异常高，暗示该期方解石中 Sr 主要来自赋矿的海相碳酸盐岩地层。而成矿期方解石的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(0.7109 ~ 0.7154，平均 0.7141)明显高于赋矿围岩对应的同时期海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值，这表明成矿流体中 Sr 应来自或流经富放射成因 ⁸⁷Sr 的外部地段。

富放射成因 ⁸⁷Sr 的潜在来源为火成硅酸盐矿物或 Rb/Sr 比值较高的碎屑岩。在徐家山矿区及附近 2000 km² 内，岩浆活动微弱，至今未发现岩浆岩出露^[9]，故由岩浆岩中硅酸盐矿物为其提供放射成因 ⁸⁷Sr 的可能性很小。考虑到该区大幕山背斜核部有中元古界冷家溪群浅变质岩出露，徐家山锑矿床的下伏基底也是这套岩系^[33]，且锑矿体均产于区域深大断裂 F₁ 下盘(图 1)，我们推测，徐家山成矿流体中 ⁸⁷Sr 最有可能来自下伏的基底碎屑岩。事实上，世界上许多热液矿床中成矿流体中的 Sr 也主要是来自碎屑岩基底^[7, 19, 20, 34-36]。

5 结论

通过对徐家山锑矿床中不同期次方解石的 C、O、Sr 同位素的系统研究，发现不同期次方解石的 C、O、Sr 同位素组成明显不同，指示其具有不同的来

1) 湖北省鄂东南地质大队，湖北省通山县徐家山锑矿床详细普查地质报告，1985。

源和形成过程。

(1)成矿前方解石的C、O同位素组成与震旦系海相碳酸盐岩一致,其Sr同位素组成与区域内海相碳酸盐岩接近,其Sr含量也异常高,表明其流体与物质主要来自赋矿围岩——震旦系海相碳酸盐岩,碳酸盐矿物的溶解与重新结晶可能是其形成的主要机制。

(2)与成矿前方解石相比,成矿期方解石的C、O同位素组成均明显较低,且二者呈线性排列,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高,而Sr含量较低,表明成矿流体为富 H_2CO_3 流体,它来自或流经了中元古界冷家溪群浅变质岩——中元古界冷家溪群浅变质岩;流体与围岩之间的水-岩反应导致徐家山成矿期方解石和辉锑矿的沉淀。

在野外工作期间得到湖北省通山县徐家山锑矿床徐盛明、谢发全及汪大兵等领导同志的支持和帮助;室内测试得到中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部同位素实验室罗续荣,中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室陈福坤、储著银、李潮峰、郑爱力等,香港大学地球科学系漆亮和中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室冯家毅、胡静等同志的指导和帮助;本文成文过程中两位匿名评审专家提供了许多建设性的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] Brannon J C, Podosek F A, Viets J G, Leach D L, Goldhaber M B, Rowan E L. Strontium isotopic constraints on the origin of ore-forming fluids of the Viburnum Trend, Southeast Missouri[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55(5): 1407 - 1419.
- [2] Kontak D J, Kerrich R. An isotopic (C, O, Sr) study of vein gold deposits in the Meguma Terrane, Nova Scotia: Implication for source reservoirs[J]. *Econ Geol*, 1997, 92(2): 161 - 180.
- [3] Wareham C D, Rice C M, Boyce A J, Rogers G. S, C, Sr, and Pb sources in the Pliocene Silver Creek porphyry Mo system, Rico, Colorado[J]. *Econ Geol*, 1998, 93(1): 32 - 46.
- [4] Savard M M, Kontak D J. $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ covariations in ore-stage calcites at and around the Gays River Zn-Pb deposit (Nova Scotia, Canada): Evidence for fluid mixing[J]. *Econ Geol*, 1998, 93(6): 818 - 833.
- [5] Savard M M, Chi G, Sami T, Williams-Jones A E, Leigh K. Fluid inclusion and carbon, oxygen, and strontium isotope study of the Polaris Mississippi Valley-Type Zn-Pb deposit, Canadian Arctic Archipelago: Implications for ore genesis[J]. *Miner Deposita*, 2000, 35(6): 495 - 510.
- [6] 彭建堂, 胡瑞忠. 湘中锡矿山超大型锑矿床的碳、氧同位素体系[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 34 - 41.
- [7] Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong. Carbon and oxygen isotope systematics in the Xikuangshan giant antimony deposit, Central Hunan[J]. *Geol Rev*, 2001, 47(1): 34 - 41 (in Chinese with English abstract).
- [8] 俞惠隆, 曹薇. 湖北徐家山锑矿床特征、稳定同位素组成及其成矿机理的初步探讨[J]. *地质论评*, 1986, 32(3): 264 - 275.
- [9] Yu Hui-long, Cao Wei. The geological characteristics and stable isotope composition of the Xujiashan antimony deposit in Hubei Province and its mechanism of ore formation [J]. *Geol Rev*, 1986, 32(3): 264 - 275 (in Chinese with English abstract).
- [10] 俞惠隆. 一种巨晶方解石脉型锑矿 [J]. *科学通报*, 1986, 31(19): 1491 - 1494.
- [11] Yu Hui-long. An antimony deposit of the megacrystalline calcite vein-type [J]. *Chinese Sci Bull*, 1987, 32(21): 1481 - 1485.
- [12] 俞惠隆. 徐家山碳酸盐地层中层控锑矿床的矿质来源与矿液性质[J]. *地球化学*, 1987, 16(2): 167 - 175.
- [13] Yu Hui-long. The material source and the properties of ore-forming solutions responsible for stratabound Sb deposits in carbonate rocks at Xujiashan, Hubei Province [J]. *Geochimica*, 1987, 16(2): 167 - 175 (in Chinese with English abstract).
- [14] 俞惠隆. 湖北徐家山辉锑矿的标型特征及其成因探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 1988, 7(4): 361 - 367.
- [15] Yu Hui-long. Typomorphic characteristics of stibnite from Xujiashan, Hubei Province with a discussion on its genesis [J]. *Acta Petrol Mineral*, 1988, 7(4): 361 - 367 (in Chinese with English abstract).
- [16] 孙汉芝, 雷蕾. 湖北徐家山层状锑矿床地质特征简介[J]. *矿床地质*, 1988, 7(2): 49 - 54.
- [17] Sun Han-zhi, Lei Lei. Geological characteristics of the Xujiashan stratified antimony deposit in Hubei Province [J]. *Mineral Deposit*, 1988, 7(2): 49 - 54 (in Chinese with English abstract).
- [18] 李江洲. 鄂南地区锑矿成矿物质来源浅析 [J]. *湖北地矿*, 1998, 12(3): 16 - 23.
- [19] Li Jiang-zhou. Analysis on the ore-forming materials source of the antimony deposit in southern Hubei [J]. *Hubei Geol Mineral Resour*, 1998, 12(3): 16 - 23 (in Chinese with English abstract).
- [20] 罗湘生. 鄂南地区锑矿地质特征、成矿作用及找矿方向 [J]. *资源环境与工程*, 2005, 19(3): 164 - 171.
- [21] Luo Xiang-sheng. Geology, metallogenesis and prospecting directions of stibium deposits in southern Hubei [J]. *Resour Environ Eng*, 2005, 19(3): 164 - 171 (in Chinese with English abstract).
- [22] Chen F, Hegner E, Todt W. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. *Int J Earth Sci*, 2000, 88(4): 791 - 802.
- [23] Chen F, Siebel W, Satir M, Terzioglu M N, Saka K. Geochronology of the Karadere basement (NW Turkey) and

- implications for the geological evolution of the Istanbul zone[J]. *Int J Earth Sci*, 2002, 91(3): 469–481.
- [17] Veizer J, Hoefs J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1976, 40(11): 1387–1395.
- [18] Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Berlin: Springer, 1997: 65–168.
- [19] 彭建堂, 胡瑞忠, 蒋国豪. 贵州晴隆锑矿床中萤石的 Sr 同位素地球化学[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(2): 244–251.
Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong, Jiang Guo-hao. Strontium isotope geochemistry of fluorites from Qinglong antimony deposit in Guizhou Province[J]. *Geol J China Univ*, 2003, 9(2): 244–251 (in Chinese with English abstract).
- [20] 彭建堂, 胡瑞忠, 赵军红, 符亚洲. 湘西沃溪 Au-Sb-W 矿床中富放射成因锶的成矿流体及其指示意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(3): 193–196.
Peng Jian-tang, Hu Rui-zhong, Zhao Jun-hong, Fu Ya-zhou. The ore-forming fluid with a marked radiogenic ^{87}Sr signature from the Woxi Au-Sb-W deposit and its significant implications [J]. *Bull Mineral Petrol Geochim*, 2003, 22(3): 193–196 (in Chinese with English abstract).
- [21] 彭渤, Frei R, 涂湘林. 湘西沃溪 W-Sb-Au 矿床白钨矿 Nd-Sr-Pb 同位素对成矿流体的示踪[J]. *地质学报*, 2006, 80(4): 561–570.
Peng Bo, Frei R, Tu Xiang-lin. Nd-Sr-Pb isotopic geochemistry of scheelite from the Woxi W-Sb-Au deposit, western Hunan: Implications for sources and evolution of ore-forming fluids[J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(4): 561–570 (in Chinese with English abstract).
- [22] Zheng Y F. Carbon-oxygen isotopic covariation in hydrothermal calcite during degassing of CO_2 : A quantitative evaluation and application to the Kushikino gold mining area in Japan [J]. *Miner Deposita*, 1990, 25(4): 246–250.
- [23] Zheng Y F. Calculation of oxygen isotope fractionation in hydroxyl-bearing silicates [J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1993, 120(3/4): 247–263.
- [24] 郑永飞. 稳定同位素体系理论模式及其矿床地球化学应用[J]. *矿床地质*, 2001, 20(1): 57–70, 85.
Zheng Yong-fei. Theoretical modeling of stable isotope systems and its applications to geochemistry of hydrothermal ore deposits [J]. *Mineral Deposit*, 2001, 20(1): 57–70, 85 (in Chinese with English abstract).
- [25] Deer W A, Howie R A, Zussman J. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* [M]. New York: Longman, 1966: 511–515.
- [26] 许成, 黄智龙, 刘从强, 漆亮, 李文博, 管涛. 四川牦牛坪稀土矿床萤石 Sr、Nd 同位素对地幔成矿流体的指示意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2003, 28(1): 41–46.
Xu Cheng, Huang Zhi-long, Liu Cong-qiang, Qi Liang, Li Wen-bo, Guan Tao. Indicator of fluorite Sr and Nd isotope to mantle-derived ore-forming fluids in Maoniuping REE deposit, Sichuan Province, China [J]. *Earth Sci*, 2003, 28(1): 41–46 (in Chinese with English abstract).
- [27] 黄智龙, 陈进, 韩润生, 李文博, 刘从强, 张振亮, 马德云, 高德荣, 杨海林. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因——兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1–187.
Huang Zhi-long, Chen Jing, Han Run-sheng, Li Wen-bo, Liu Cong-qiang, Zhang Zhen-liang, Ma De-yun, Gao De-rong, Yang Hai-lin. *Geochemistry and Ore-Formation of the Huize Giant Lead-Zinc Deposit, Yunnan Province, China: Discussion on the Relationship between Emeishan Flood Basalts and Lead-Zinc Mineralization* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1–187 (in Chinese).
- [28] Veizer J. Strontium isotopes in seawater through time[J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1989, 17: 141–167.
- [29] Burke W H, Denison R E, Hetherington E A, Koepnick R B, Nelson H F, Otto J B. Variation of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ throughout Phanerozoic time[J]. *Geology*, 1982, 10(10): 516–519.
- [30] Veizer J, Buhl D, Diener A, Ebneth S, Podlaha O G, Bruckschen P, Jasper T, Korte C, Schaaf M, Ala D, Azmy K. Strontium isotope stratigraphy: Potential resolution and event correlation[J]. *Palaeogeogr, Palaeoclimatol, Palaeoecol*, 1997, 132(1–4): 65–77.
- [31] Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater[J]. *Chem Geol*, 1999, 161(1–3): 59–88.
- [32] 杨杰东, 张俊明, 陶仙聪, 王宗哲. 末元古系—寒武系底 Sr、C 同位素对比[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(4): 532–545.
Yang Jie-dong, Zhang Jun-ming, Tao Xian-cong, Wang Zong-zhe. Strontium and carbon isotopic calibration of the terminal Proterozoic [J]. *Geol J China Univ*, 2000, 6(4): 532–545 (in Chinese with English abstract).
- [33] 湖北省地质矿产局. 湖北省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989: 1–705.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province. *Regional Geology of Hubei Province* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1–705 (in Chinese with English abstract).
- [34] Medford G A, Maxwell R J, Armstrong R L. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio measurements on sulfides, carbonates, and fluid inclusions from Pine Point, Northwest Territories, Canada: An $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio increase accompanying the mineralizing process[J]. *Econ Geol*, 1983, 78(7): 1375–1378.
- [35] Lange S, Chaudhuri S, Clauer N. Strontium isotopic evidence for the origin of barites and sulfides from the mississippi valley-type ore deposits in southeast Missouri[J]. *Econ Geol*, 1983, 78(6): 1255–1261.
- [36] Deng Hailin, Li Chaoyang, Tu Guangzhi, Zhou Yunman, Wang Chongwu. Strontium isotope geochemistry of the Lemachang independent silver ore deposit, northeastern Yunnan, China [J]. *Sci China (D)*, 2000, 30(4): 337–346.