

文章编号: 1000-4734(2013)03-0271-07

贵州独山巴年锑矿床硫、铅同位素特征及其对成矿物质来源的指示

沈能平¹, 苏文超¹, 符亚洲¹, 徐春霞^{1,2}, 阳杰华¹, 蔡佳丽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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 贵州独山巴年锑矿床是华南锑矿带代表性锑矿床之一。矿体赋存于中泥盆统独山组地层之中。本文对该矿床辉锑矿的硫、铅同位素组成进行了系统分析。结果表明, 辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-5.4\% \sim -1.2\%$, 平均 -4.2% , 计算获得成矿流体中总硫的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}=0.1\%$, 显示岩浆来源硫的同位素特征。辉锑矿铅同位素组成变化范围较窄: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $18.561 \sim 19.156$, 平均 18.813 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.703 \sim 15.769$, 平均 15.734 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $38.573 \sim 39.207$, 平均 38.906 。绝大多数样品中矿石铅为正常铅, 具有华南区域性铅同位素组成特征。我们认为巴年锑矿床成矿金属元素锑除主要来源于赋矿围岩泥盆系外, 基底地层也可能提供了部分成矿物质。

关键词: 辉锑矿; 硫同位素; 铅同位素; 成矿物质来源; 巴年锑矿床

中图分类号: P597; P611

文献标识码: A

作者简介: 沈能平, 男, 1979年生, 博士, 副研究员, 矿床地球化学专业, 主要从事中低温热液矿床成矿理论研究。E-mail: shennengping@vip.gyig.ac.cn

黔东南独山锑矿田是贵州省除晴隆县外锑矿资源最丰富的地区, 属于三都-丹寨汞锑成矿带的南延部分, 目前该锑矿田已发现包括半坡(大型)、巴年(中型)、蕊然沟(小型)等锑矿床(点)矿化点近20处。前人对该区锑矿地质地球化学已进行了大量的研究, 认为其成矿物质主要来源于赋矿的围岩地层^[1-3], 但独山地区从中志留统至中泥盆统的翁项群($S_{1-2}\text{wn}$)、丹林组($D_{1\text{dn}}$)、龙洞水组($D_{2\text{l}}$)、邦寨组($D_{2\text{b}}$)、独山组($D_{2\text{d}}$)均有锑矿(化)体产出, 赋矿围岩时代跨度较大, 难以有效制约物源。本次研究以巴年锑矿床最主要的矿石矿物——辉锑矿为研究对象, 系统测试了其硫、铅同位素组成, 利用硫、铅联合示踪优势, 进一步分别探讨了其硫源和成矿金属锑的来源。

1 矿区地质概况

巴年锑矿床是独山锑矿田内代表性锑矿床

收稿日期: 2012-09-24

基金项目: 贵州省科学技术基金(编号: 黔科合 J 字[2009]2249、[2008]2227号); 国家自然科学基金(批准号: 40972072); 中国科学院重要方向项目(编号: KZCX2-YW-Q04-05); 矿床地球化学国家重点实验室自主研究课题

之一, 其位于环“江南古陆”南西端, 产于独山箱状背斜轴部南西倾伏部位。矿区出露地层主要为中泥盆统独山组($D_{2\text{d}}$)浅海相碳酸盐岩和碎屑岩, 与下伏地层中泥盆统邦寨组($D_{2\text{b}}$)为整合接触(图1)。按岩性不同, 独山组自下而上可划分为三段: 鸡泡段($D_{2\text{d}}^1$)、宋家桥段($D_{2\text{d}}^2$)和鸡窝寨段($D_{2\text{d}}^3$)。其中宋家桥段按其岩性组合特征又可分为上、下两个亚段: 下亚段($D_{2\text{d}}^{2-1}$)为中至厚层中粒石英砂岩夹薄层泥质灰岩或灰岩透镜体; 上亚段($D_{2\text{d}}^{2-2}$)为碳酸盐岩与碎屑岩互层, 是巴年锑矿的主要赋矿层位。矿区内未见岩浆岩出露。北北西向的独山箱状背斜和半巴断裂、打鱼河断裂是矿区的主要控矿构造。矿化沿背斜轴部分布, 主断裂的旁侧构造和层间破碎带为容矿构造。矿体的大小和富集程度与构造的产状和发育程度有关, 断裂组平行、交汇、膨胀地段均是富矿体的产出部位。

巴年锑矿床矿化范围大, 但矿体小, 变化较大, 与围岩界线大多为突变关系。矿区虽具多层赋矿特点, 但在垂向上很少有矿体重叠出现。每个矿化体包含若干矿体, 矿体呈似层状、透镜状等缓倾斜顺层产出, 与岩层产状一致, 倾向南西,

倾角 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。矿体规模大小不一,小者长十几米甚至几米,大者四五十米,百米以上者罕见。矿化体一般多为 $100 \sim 200$ m 长,大者可达 $500 \sim 600$ m,但连续性差。矿石的矿物成分较简单,金属矿物主要为辉锑矿,次为黄铁矿,此外近地表有少量锑的氧化物(锑华、锑赭石等);非金属矿物有碳酸盐(方解石、白云石)和石英。矿石中广泛发育结晶、交代成因的组构特征:矿石结构主要有自形晶、半自形晶结构,其次为交代残余结构;矿石构造有浸染状、角砾状、块状、晶簇状及(网)脉状等。围岩蚀变以碳酸盐化、硅化为主,黄铁矿化、炭化次之。

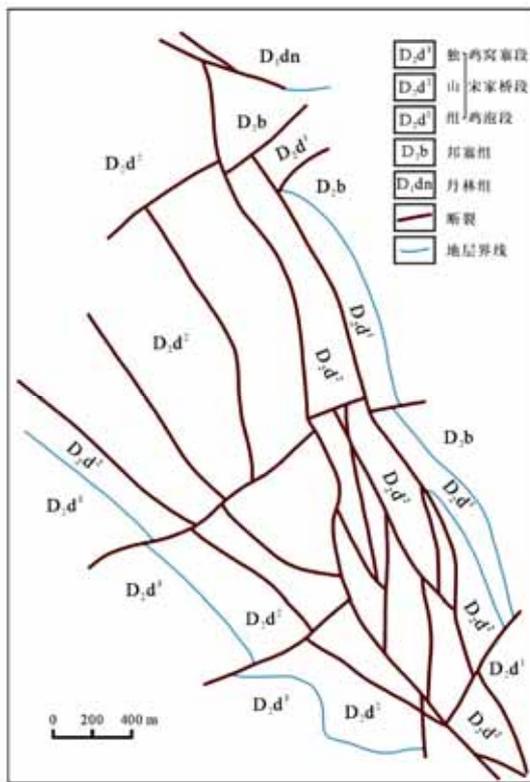


图 1 巴年锑矿床地质图(据王学焜和金世昌^[4]修改)
Fig. 1. Geological sketch map of Banian antimony deposit.

2 样品的采集与测试

13 件矿石样品主要采自巴年锑矿床的 4 个坑道内,样品中辉锑矿大多呈晶簇状或致密块状产出。将每件样品碎至 $40 \sim 80$ 目,在双目镜下人工挑选辉锑矿单矿物,然后用玛瑙钵研磨至 200 目以下。

辉锑矿硫同位素分析测试在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成。测试仪器为 IsoPrime JB144。测试过程中使

用标准样 GBW04414 进行监控。分析精密度的 (2σ) 为 $\pm 0.2\%$ 。分析结果 $\delta^{34}\text{S}$ 以 CDT 为标准。

辉锑矿铅同位素分析测试在核工业北京地质研究院 ISOPROBE-T 热电离质谱仪上完成。该仪器对 $1 \mu\text{g}$ 的铅 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 测量精度优于 0.005% 。测试过程中使用国家标准样 NBS981 进行监控。

3 测试结果与分析讨论

3.1 硫同位素

巴年锑矿床 13 件辉锑矿样品的硫同位素组成列于表 1。结果表明,该矿床辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围为 $-5.4\% \sim -1.2\%$,平均值为 -4.2% ,极差为 4.2% ,在直方图中呈塔式正态分布(图 2),说明成矿流体中硫的来源比较单一。巴年锑矿床辉锑矿的硫同位素组成不同于独山锑矿田内其它锑矿床辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值,如蕊然沟($+3.7\% \sim +7.9\%$,平均 $+6.6\%$)^[5]和半坡($+3.4\% \sim +6.9\%$,平均 $+5.2\%$)^[3,5]。在区域上,独山锑矿田从北至南,即从半坡经甲拜至巴年,辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值具有从正值过渡到负值的趋势($+5.2\% \rightarrow -3.7\% \rightarrow -4.4\%$,表 2);与辉锑矿共生的石英、方解石流体包裹体均一温度显示,从半坡至巴年锑矿床,成矿流体的温度有所降低^[6],可能反映了独山锑矿田成矿流体从北向南的运移方向。

前人研究认为巴年锑矿床中的硫主要来源于泥盆系围岩地层中硫酸盐的还原^[3]。海相硫酸

表 1 巴年锑矿床辉锑矿硫同位素组成

Table 1. Sulfur isotopic composition of stibnite from Banian antimony deposit

序号	样品号	采样位置	矿物组合	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}} (\%)$	
				数值	标准差
1	DSW-1		Sti	-4.63	0.07
2	DSW-2	大羊沟	Sti	-4.51	0.03
3	DSW-3		Sti+Cc	-5.37	0.12
4	BNS-1		Sti	-2.88	0.00
5	BNS-2	巴年3号坑	Sti	-3.54	0.05
6	BNS-3		Sti	-3.56	0.02
7	BNY-1		Sti+Cc	-4.36	0.02
8	BNY-2	巴年一号井	Sti	-5.39	0.00
9	BNY-3		Sti+Cc	-4.77	0.03
10	BNY-4		Sti	-4.72	0.03
11	BPG-1		Sti	-4.96	0.08
12	BPG-2	民采坑道	Sti+Cc	-1.24	0.02
13	BPG-4		Sti+Cc	-4.75	0.03

注:Sti-辉锑矿,Cc-方解石。

表2 华南锑矿带内代表性锑矿床辉锑矿硫同位素组成

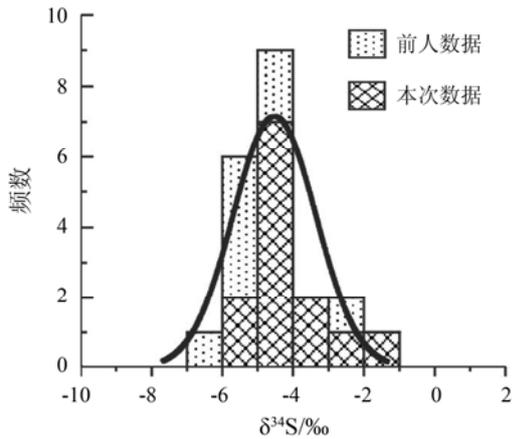
Table 2. Sulfur isotopic composition of stibnite from representative antimony deposits in the South China Sb belt

省区	序号	矿床	赋矿层位	元素组合	$\delta^{34}\text{S}$ (‰)		资料来源
					变化范围	平均值	
广西	1	马雄	D ₁	Sb	+3.6 ~ +7.7		杨春林 ^[7] (15), 袁万春等 ^[8] (?)
江西	2	驼背山	C ₃	Sb	-4.8 ~ -0.9	-3.4	高奉林和叶少贞 ^[9] (8)
贵州	3	巴年	D ₂	Sb	-6.3 ~ +2.6	-4.4	崔银亮 ^[11] (3), 崔银亮 ^[3] (15), 王学焜 ^[5] (5), 本文 (13)
	4	半坡	D ₁	Sb	+3.4 ~ +7.5	+5.2	崔银亮 ^[3] (39), 王学焜 ^[5] (32)
	5	甲拜	D ₂	Sb	-9.2 ~ +2.2	-3.7	崔银亮 ^[3] (8)
	6	蕊然沟	S ₁₋₂	Sb	+3.7 ~ +7.9	+6.6	崔银亮 ^[3] (11)
	7	晴隆大厂	P ₁	Sb	-5.0 ~ +2.3		廖善友和胡涛 ^[10] (17), 陈代演 ^[11] (18), 刘文均 ^[12] (14), 叶造军 ^[13] (?), 张国林和谷湘平 ^[14] (30), 格西 ^[15] (4)
	8	板溪	Pt ₃	Sb-Au	+1.1 ~ +6.6		鲍振襄 ^[16] (18), 罗献林 ^[17] (18)
	9	符竹溪	Pt ₃	Au-Sb	-7.3 ~ -3.6	-5.7	鲍振襄 ^[16] (2), 姚振凯和朱蓉斌 ^[18] (2)
湖南	10	柑子园	O ₁	Sb-Zn	+3.1 ~ +5.0	+3.7	鲍振襄 ^[16] (5)
	11	合心桥	Pt ₂	Sb-Au	-0.7 ~ +1.5	+0.4	鲍振襄 ^[16] (2)
	12	龙山	Z ₁	Sb-Au	-2.1 ~ +1.2	-0.4	罗献林 ^[17] (14)
	13	龙王江	Pt ₃	Au-Sb-As	-12.0 ~ -2.2		鲍振襄 ^[16] (5), 鲍振襄 ^[19] (?), 鲍振襄 ^[20] (8)
	14	同心		Sb-Au	+0.2 ~ +2.4	+1.4	鲍振襄和鲍珏敏 ^[21] (5)
	15	沃溪	Pt ₃	Au-Sb-W	-8.6 ~ +3.5		鲍振襄 ^[16] (20), 罗献林 ^[17] (5), 刘建明等 ^[22] (6), 鲍振襄等 ^[23] (25), 顾雪祥等 ^[24] (18)
	16	西冲	Pt ₂	Au-Sb-W	-14.3 ~ +3.7		鲍振襄 ^[16] (7), 鲍振襄等 ^[23] (8)
	17	锡矿山	D ₃ -D ₂	Sb	-3.3 ~ +16.8		文国璋等 ^[25] (20), 金景福等 ^[26] (127), 陶琰等 ^[27] (387)
	18	小牛头寨	Z ₂	Sb	+1.3 ~ +2.7	+1.9	罗献林 ^[17] (3)
	19	羊皮帽	Pt ₃ -Z	Sb-Au	+0.6 ~ +5.2	+2.4	鲍振襄 ^[16] (6)
云南	20	渣滓溪	Pt ₃	W-Sb	+4.2 ~ +11.8		鲍振襄 ^[16] (27), 鲍振襄和鲍珏敏 ^[21] (20)
	21	理达	C ₂	Sb	-7.5 ~ -2.0	-4.8	陈代演 ^[11] (2)
	22	富源老厂	P ₂	Sb	-6.7 ~ -1.5	-3.3	陈代演 ^[28] (7)
	23	革当、九克等	D ₁	Sb	+9.5 ~ +13.5	+11.9	陈代演 ^[11] (10)
	24	木利	D ₁	Sb	-26.0 ~ +3.8		陈代演 ^[11] (13), 刘文均 ^[12] (9), 王林江 ^[29] (13), 袁万春等 ^[8] (?), 格西 ^[15] (9)
	25	小锡板	D ₁	Sb	+2.8 ~ +5.4	+4.1	陈代演 ^[11] (2)

注: 资料来源中小括号里的数字为参加统计的样品数, “?” 表示未知; 部分矿床参加统计的样品有重复。

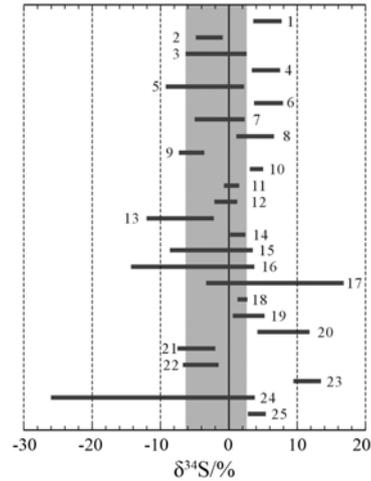
盐的还原机制, 目前存在 2 种观点: 热化学还原, 发生在相对高温条件下 (> 175), 产生的还原态硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对稳定; 细菌还原, 发生在相对低温条件下 (< 120), 其还原态硫的 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较大, 一般为 -20% ~ -10% , 甚至高达 -50% ^[30-33]。与巴年锑矿床赋矿围岩同时代海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $+20\%$ 左右, 同时巴年锑矿床辉锑矿硫同位素组成较为稳定 (-5.4% ~ -1.2%), 成矿流体温度介于 $118 \sim 173$ (平均 145)^[6], 暗示巴年锑矿床成矿流体中的还原态硫不可能完全由海相硫酸盐的热化学或细菌还原机制形成。对比华南锑矿带内典型锑、锑-金矿床辉锑矿的硫同位素组成 (表 2 和图 3), 发

现绝大多数矿床中辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 -10% ~ $+10\%$ 范围内变化。尤其值得注意的是, 巴年锑矿床辉锑矿的硫同位素组成范围与那些硫源为岩浆岩的锑矿床 (武宁驼背山、晴隆大厂、富源老厂) 中辉锑矿及广西大厂锡多金属矿田中含锑硫化物^[34]的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相近, 指示了巴年锑矿床成矿流体中的硫具岩浆硫源特征。此外, 利用 Barnes^[35] 辉锑矿与 H_2S 的硫同位素分馏方程 $[1000\ln\alpha(\text{Sb}_2\text{S}_3-\text{H}_2\text{S}) = -0.75 \times 10^6/T^2]$ 和流体包裹体均一温度 (145)^[6], 计算获得成矿流体中总硫的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{TS}}$ 约为 0.1% , 与地幔来源硫的同位素组成 ($1.3 \pm 3.8\%$)^[36] 一致, 进一步指示了巴年锑矿床的硫可能主要来源于岩浆硫。



前人数据引自崔银亮^[1] (3) 和王学焜^[5] (5), 小括号里的数字为样品数

图 2 巴年锑矿床辉锑矿硫同位素组成直方图
Fig. 2. Histogram showing $\delta^{34}\text{S}$ values of stibnite from Banian antimony deposit.



注：数字对应于表 2 中序号所代表的矿床

图 3 华南锑矿带内典型锑矿床中辉锑矿硫同位素组成对比
Fig. 3. Sulfur isotopic composition of stibnite from representative antimony deposits in the South China Sb belt.

表 3 巴年锑矿床辉锑矿铅同位素组成及其特征值

Table 3. Lead isotopic composition and characteristic parameters of stibnite from Banian antimony deposit

样品号	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2σ	T/Ma	μ	ω	Th/U	V_1	V_2	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
DSW-1	19.119	0.002	15.752	0.002	38.652	0.005	-156	9.69	35.10	3.51	82.63	88.42	111.82	27.80	37.16
DSW-2	18.914	0.002	15.764	0.002	38.766	0.005	8	9.73	36.68	3.65	80.12	77.39	99.90	28.58	40.21
DSW-3	18.653	0.002	15.705	0.001	38.573	0.004	122	9.64	36.73	3.69	68.78	65.42	84.72	24.73	35.04
BNS-1	18.561	0.002	15.704	0.002	38.862	0.005	187	9.65	38.40	3.85	73.39	57.69	79.37	24.67	42.79
BNS-2	18.654	0.002	15.707	0.002	39.154	0.004	124	9.65	39.09	3.92	82.80	59.07	84.78	24.86	50.63
BNS-3	18.654	0.002	15.703	0.002	39.150	0.004	119	9.64	39.04	3.92	82.71	59.02	84.78	24.60	50.52
BNY-1	18.678	0.002	15.707	0.001	39.034	0.004	107	9.65	38.48	3.86	80.53	61.58	86.17	24.86	47.41
BNY-2	18.642	0.002	15.726	0.003	38.902	0.006	156	9.69	38.32	3.83	76.43	61.71	84.08	26.10	43.86
BNY-3	18.701	0.002	15.724	0.002	39.132	0.006	111	9.68	38.91	3.89	83.48	62.00	87.51	25.97	50.04
BNY-4	18.743	0.001	15.766	0.002	39.207	0.004	133	9.75	39.38	3.91	86.36	64.17	89.95	28.71	52.05
BPG-1	19.156	0.002	15.754	0.002	38.767	0.005	-181	9.70	35.38	3.53	86.35	89.01	113.97	27.93	40.24
BPG-2	19.150	0.002	15.769	0.002	38.754	0.004	-157	9.72	35.49	3.53	85.88	89.19	113.62	28.91	39.89
BPG-4	18.944	0.001	15.763	0.001	38.819	0.003	-15	9.73	36.72	3.65	82.17	78.25	101.64	28.52	41.64

注：参数使用 GeoKit 软件包^[37]计算， T 取 130 Ma。

3.2 铅同位素

巴年锑矿床 13 件辉锑矿样品的铅同位素组成列于表 3。结果显示，辉锑矿铅同位素组成变化范围较窄： $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 18.561 ~ 19.156，平均 18.813； $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 15.703 ~ 15.769，平均 15.734； $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 38.573 ~ 39.207，平均 38.906。

在 Zartman 和 Doe^[38]铅构造模式图解中 (图 4B)，巴年辉锑矿样品的铅同位素组成均位于上地壳铅演化线上方，表明辉锑矿中的铅主要来自于上地壳。巴年辉锑矿铅单阶段模式年龄可分成两组 (表 3 和图 5)：模式年龄为极小的正值和负

值划为一组，除 DSW-2 外均位于地球等时线右侧 (图 5)，显示异常铅特征，同时表明该组样品的模式年龄没有任何实际地质意义；另一组其模式年龄变化范围为 107 ~ 187 Ma，平均 132 Ma，远小于赋矿围岩中泥盆世时代范围 (380 ~ 400 Ma)，具明显的正常铅特征。根据贵州区域构造及其演化特征，黔东南地区的构造格局，直至燕山运动才定型^[39]。同时，前人也一致认为独山地区锑矿的成矿富集期应是燕山期。表明该组模式年龄具有一定的地质指示意义，可能指示了锑成矿作用发生的时间，最近王加昇^[40]获得了巴年锑矿床成矿期方解石 Sm-Nd 等时线年龄 (126 ~ 128 Ma)，该年龄值也支持我们的推论。

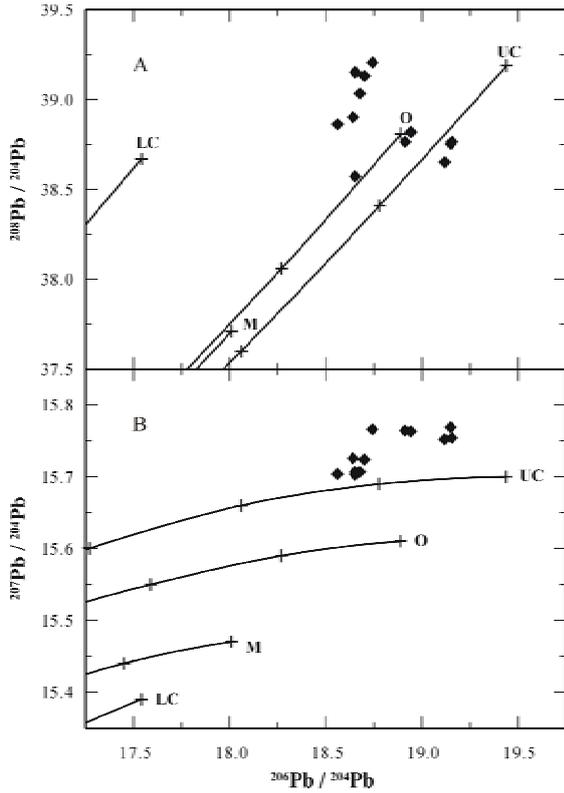


图 4 巴年锑矿床辉锑矿铅同位素组成分布图 (铅演化线据 Zartman 和 Doe^[38])

Fig. 4. Lead isotope compositions of stibnite from Banian antimony deposits.

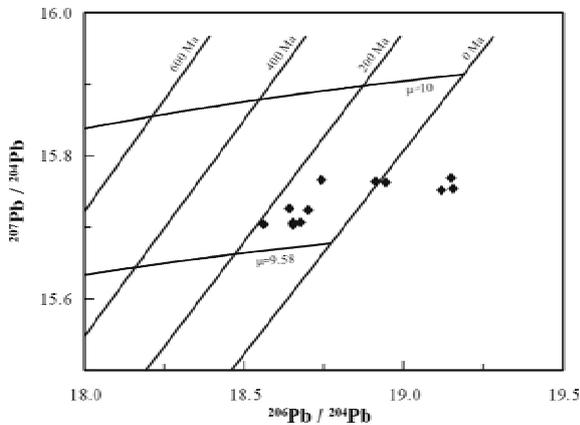


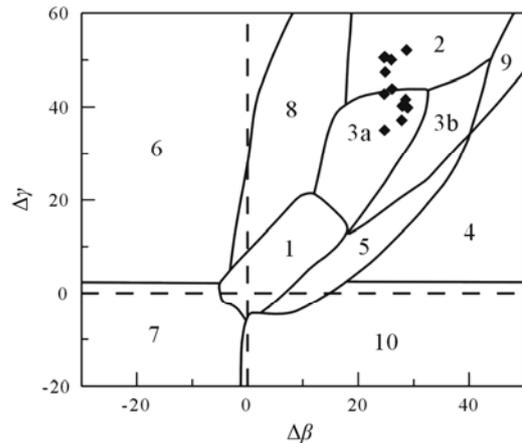
图 5 巴年锑矿床辉锑矿铅同位素单阶段演化模式图

Fig. 5. Single-stage evolution model of lead isotope for stibnite from Banian antimony deposit.

与巴年矿床锑有成因联系的铅源区的 ²³⁸U/²⁰⁴Pb (μ 值) 变化范围为 9.64 ~ 9.75 (平均 9.69), 均大于地球正常 μ 值 (9.58), 具高放射成因壳源铅特征; 其模式 Th/U 比值为 3.51 ~ 3.92

(平均 3.75), 绝大部分低于全球上地壳平均值 3.88^[41], 但均大于中国大陆上地壳平均值 3.47^[42]; 其 ²³²Th/²⁰⁴Pb (ω 值) 变化范围为 35.10 ~ 39.38 (平均 37.52), 绝大部分高于地球的正常值 (36.5), 表明巴年锑矿床辉锑矿中的铅可能来自于富铀-钍-铅的源区。

根据朱炳泉等^[43]提出的公式, 计算出巴年锑矿床矿石铅的铅同位素特征值 (表 3), 其 V_1 和 V_2 值变化范围分别为 68.78 ~ 86.36 (平均 80.89) 和 57.69 ~ 89.19 (平均 70.22), 落入华南富钍铅与铀铅省的 V_1 和 V_2 值范围内^[43]。其 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ 值的变化范围分别为 79.37 ~ 113.97 (平均 94.02)、24.60 ~ 28.91 (平均 26.63) 和 35.04 ~ 52.05 (平均 43.96)。在矿石铅同位素的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解中 (图 6), 巴年矿石铅落在上地壳源铅和上地壳与地幔混合的俯冲带岩浆作用铅范围内。这一特征与华南的区域性铅特征 (壳源与壳幔俯冲带混合型铅)^[43]一致。



1-地幔源铅; 2-上地壳源铅; 3-上地壳与地幔混合的俯冲带铅 (3a-岩浆作用; 3b-沉积作用); 4-化学沉积型铅; 5-海底热水作用铅; 6-中深变质作用铅; 7-深变质作用下地壳铅; 8-造山带铅; 9-古老页岩上地壳铅; 10-退变质作用铅

图 6 巴年锑矿床辉锑矿铅同位素的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解 (底图据朱炳泉等^[43])

Fig. 6. $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ diagram of genetic classification for stibnite from Banian antimony deposit.

3.3 硫、铅同位素组成关系及成矿物质来源探讨

综合本次测试的巴年锑矿床辉锑矿硫、铅同位素组成数据 (表 1 和表 3), 可以考察它们二者之间的关系 (图 7)。但投点后发现, 二者线性关系很不明显。若将 13 件样品依据含放射成因铅的多少 (亦可依据单阶段模式年龄 T 值) 分成 2 组 (A 组和 B 组), 则含放射成因铅较少的一组 (B 组), 其硫同位素组成与 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁷Pb/

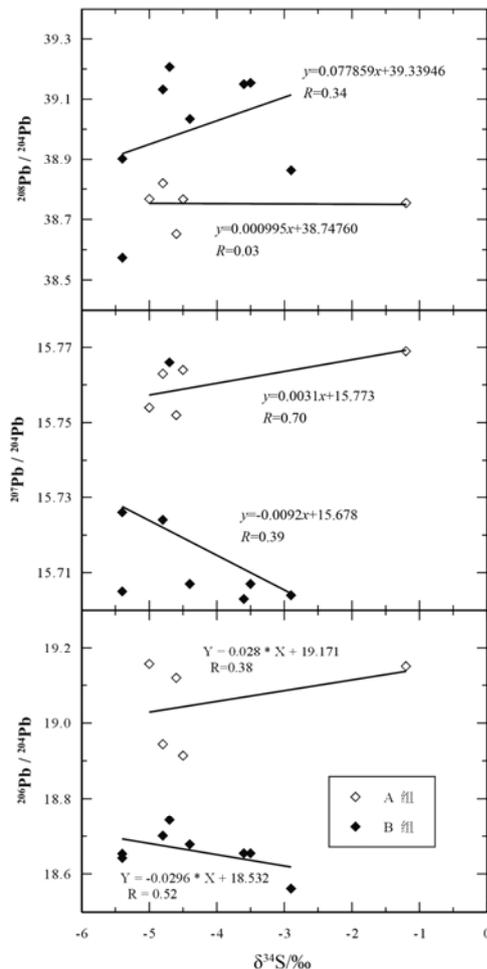


图 7 巴年锑矿床辉锑矿硫、铅同位素组成关系图
Fig. 7. Relationship between sulfur and lead isotopic compositions of stibnite from Banian antimony deposit.

^{204}Pb 之间具一定的线性负相关关系。总体来说, 线性关系不明显, 或许指示了它们的来源不同。此外, 巴年锑矿床存在两种差异不是很明显的矿石铅, 其中异常铅的存在, 表明锑矿成矿过程中, 有异常铅源的混染, 基底地层最有可能提供这部分异常铅。巴年矿床辉锑矿铅同位素组成特征指示其金属元素锑的来源有两部分, 最主要是来自赋矿的围岩地层(泥盆系), 另有少量可能由基底地层提供。

4 结论

(1) 巴年锑矿床辉锑矿的硫同位素组成稳定 ($-5.4\text{‰} \sim -1.2\text{‰}$, 平均 -4.2‰), 在直方图中呈塔式正态分布, 表明成矿流体中硫的来源比较单一, 同时计算获得成矿流体中总硫的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}=0.1\text{‰}$, 指示了该矿床的硫可能主要来源于岩浆硫。

(2) 该矿床辉锑矿的铅同位素组成变化范围较窄, 大部分样品具正常铅特征, 亦有少部分具异常铅特征, 总体与华南的区域性铅特征一致。铅同位素示踪分析认为成矿金属元素——锑有 2 种来源, 除主要来源于赋矿围岩——泥盆系外, 基底地层也可能提供了部分成矿物质。

致谢: 硫、铅同位素分析测试分别得到中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室安宁同志、核工业北京地质研究院刘牧女士的帮助。审稿专家也提供了部分建设性的修改意见。在此一并致以诚挚的谢意!

参 考 文 献:

- [1] 崔银亮. 贵州独山巴年锑矿床地质特征及成矿地质条件研究[D]. 昆明: 昆明工学院硕士学位论文, 1992: 1-112.
- [2] 崔银亮, 金世昌. 独山巴年锑矿床成矿物质来源研究[J]. 西南矿产地质, 1993, 7(1): 21-26.
- [3] 崔银亮. 贵州独山锑矿床成矿物质来源研究[J]. 有色金属矿产与勘查, 1995, 4(4): 193-199.
- [4] 王学焜, 金世昌. 贵州独山锑矿地质[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1994: 1-155.
- [5] 王学焜. 贵州独山改造型锑矿床地球化学特征[J]. 地质论评, 1995, 41(1): 61-73.
- [6] 王雅丽, 金世昌. 贵州独山半坡与巴年锑矿包裹体地球化学特征对比[J]. 有色金属, 2010, 62(3): 123-128.
- [7] 杨春林. 广西马雄锑矿床地质特征及矿化富集规律[J]. 地质与勘探, 1993, 29(10): 16-21.
- [8] 袁万春, 李院生, 张国平, 龙洪波. 滇黔桂地区汞锑金砷等低温矿床组合碳、氢、氧、硫同位素地球化学[J]. 矿物学报, 1997, 17(4): 422-426.
- [9] 高奉林, 叶少贞. 驼背山锑矿床地质特征及成矿机理浅析[J]. 化工矿产地质, 2006, 28(3): 133-139.
- [10] 廖善友, 胡涛. 贵州晴隆大厂锑矿床控矿条件及成矿机制[J]. 贵州地质, 1990, 7(3): 229-236.
- [11] 陈代演. 滇东黔西主要层控锑汞矿床稳定同位素研究[J]. 贵州地质, 1991, 8(3): 227-240.
- [12] 刘文均. 华南几个锑矿床的成因探讨[J]. 成都地质学院学报, 1992, 19(2): 10-19.
- [13] 叶造军. 贵州大厂锑矿流体包裹体与稳定同位素[J]. 地质地球化学, 1996, 24(5): 18-20.
- [14] 张国林, 谷湘平. 中国主要类型锑矿床硫同位素组成及地球化学特征[J]. 矿产与地质, 1999, 13(3): 172-178.
- [15] 格西. 黔西南晴隆大厂锑矿床辉锑矿流体包裹体研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所硕士学位论文, 2011: 1-68.
- [16] 鲍振襄. 湖南西部层控锑矿床[J]. 矿床地质, 1989, 8(4): 49-60.
- [17] 罗献林. 湖南前寒武系锑矿床的成矿地质特征[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14(4): 335-349.
- [18] 姚振凯, 朱蓉斌. 湖南符竹溪金矿床多成因模式及其找矿意义[J]. 大地构造与成矿学, 1993, 17(3): 199-209.
- [19] 鲍振襄. 江南古岛弧带金矿床中黄铁矿-毒砂-辉锑矿含金性研究[J]. 黄金科学技术, 1993, 1(3): 40-47.

- [20] 鲍振襄. 湖南龙王江锑砷金矿田地质特征及控矿因素[J]. 黄金地质, 1996, 2(4): 21-27.
- [21] 鲍振襄, 鲍珏敏. 渣滓溪锑矿带地质特征及成矿条件探讨[J]. 湖南地质, 1991, 10(1): 25-32.
- [22] 刘建明, 顾雪祥, 刘家军, 郑明华. 华南巨型锑矿带的特征及其制约因素[J]. 地球物理学报, 1998, 41(增刊): 206-215.
- [23] 鲍振襄, 万容江, 鲍珏敏. 湘西锑金矿床成矿系列及其稳定同位素研究[J]. 北京地质, 1999, 11(1): 11-17.
- [24] 顾雪祥, 刘建明, Schulz O, Vavtar F, 郑明华. 湖南沃溪锑-金建造矿床同生成因的微量元素和硫同位素证据[J]. 地质科学, 2004, 39(3): 415, 424-439.
- [25] 文国璋, 吴强, 刘汉元, 谢国柱, 雷秀柳. 锡矿山超大型锑矿床控矿规律及形成机理初步研究[J]. 地质与勘探, 1993, 29(7): 20-27.
- [26] 金景福, 陶琰, 曾令交. 锡矿山式锑矿床的成矿流体研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(3): 156-164.
- [27] 陶琰, 高振敏, 金景福, 曾令交. 湘中锡矿山式锑矿成矿物质来源探讨[J]. 地质地球化学, 2001, 29(1): 14-20.
- [28] 陈代演. 云南富源老厂层控锑矿床的地球化学特征[J]. 贵州工学院学报, 1990, 19(2): 18-27.
- [29] 王林江. 云南木利锑矿床的成因[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14(4): 350-354.
- [30] 张理刚. 稳定同位素在地质科学中的应用——金属活化热液成矿作用及找矿[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1985: 1-266.
- [31] Machel H G. Relationships between sulphate reduction and oxidation of organic compounds to carbonate diagenesis, hydrocarbon accumulations, salt domes, and metal sulphide deposits [J]. *Carbonates and Evaporites*, 1989, 4: 137-151.
- [32] Jorgensen B B, Isaksen M F, Jannasch H W. Bacterial sulfate reduction above 100 °C in deep-sea hydrothermal vent sediments [J]. *Science*, 1992, 258(5089): 1756-1757.
- [33] Dixon G, Davidson G J. Stable isotope evidence for thermochemical sulfate reduction in the Dugald River (Australia) strata-bound shale-hosted zinc-lead deposit [J]. *Chemical Geology*, 1996, 129(3-4): 227-246.
- [34] 何海洲, 叶绪孙. 广西大厂矿田矿质来源研究[J]. 西南矿产地质, 1996, 10(3): 2-8.
- [35] Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* (Second edition) [M]. New York: Wiley, 1979.
- [36] Seal R R. Sulfur isotope geochemistry of sulfide minerals [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2006, 61: 633-677.
- [37] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459-464.
- [38] Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics — The model [J]. *Tectonophysics*, 1981, 75(1-2): 135-162.
- [39] 杭家华. 独山锑矿田成矿控制条件与找矿靶区[J]. 西南矿产地质, 1992, 6(2): 16-24.
- [40] 王加昇. 西南低温成矿域成矿作用、时代与动力学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士学位论文, 2012: 1-116.
- [41] Zartman R E, Haines S M. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs — A case for bi-directional transport [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(6): 1327-1339.
- [42] 李龙, 郑永飞, 周建波. 中国大陆地壳铅同位素演化的动力学模型[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 61-68.
- [43] 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟, 陈毓蔚, 范嗣昆, 桂训唐, 王慧芬. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-330.

Characteristics of Sulfur and Lead Isotopes for Banian Antimony Deposit in Dushan Area, Guizhou Province, China: Implication for Origin of Ore-forming Materials

SHEN Neng-ping¹, SU Wen-chao¹, FU Ya-zhou¹, XU Chun-xia^{1,2}, YANG Jie-hua¹, CAI Jia-li¹

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

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

Abstract: The Sulfur and lead isotopic compositions of stibnite from Banian antimony deposit, located in Dushan County, Guizhou Province, one of representative antimony deposits in the South China Sb belt, whose orebodies hosted by the Dushan Formation of the Middle Devonian, were systematically analyzed in this study. The results show that $\delta^{34}\text{S}$ values of stibnite range from -5.4‰ to -1.2‰ with an average of -4.2‰. The calculated $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ value in ore-forming fluid is -0.1‰, indicating that sulfur of stibnite may be sourced from magma. Lead isotopic compositions vary over a narrow range, with $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.561 - 19.156$ (averaging 18.813), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.703 - 15.769$ (averaging 15.734) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.573 - 39.207$ (averaging 38.906). The majority of ore lead is normal. Meanwhile, the characteristics of ore lead isotopes of Banian deposit are consistent with that of regional lead from the South China. We conclude that the metal (mainly Sb) of this deposit is dominantly derived from the Devonian host rocks and partly possible derived from the basement strata.

Key words: stibnite; sulfur isotope; lead isotope; source of ore-forming material; Banian antimony deposit